

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



## **Estudo preliminar da correlação espacial de radiação solar e descritores de forma urbana: Aplicação na cidade de Lisboa**

Tiago Alexandre Francisco Lourenço

**Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente**

Dissertação orientada por:

Miguel Centeno Brito

Cristina Catita

## Resumo

Hoje em dia, as cidades apresentam-se como uma boa oportunidade para a produção de energia, com vastas áreas de telhados e fachadas passíveis de serem utilizadas para aproveitamento de energia solar. Este aproveitamento é, no entanto, influenciado pelas características morfológicas próprias das cidades. Torna-se então necessário estudar como varia o potencial solar numa cidade, encontrando as melhores áreas para a instalação de sistemas de energia solar. Atualmente para a determinação do potencial solar com precisão são utilizados algoritmos complexos que implicam uma grande capacidade de computação. O presente estudo pretende apresentar uma metodologia que simplifique a determinação do potencial solar, nas divisões censitárias de uma cidade e com um carácter preliminar, através da criação de um modelo de regressão linear com componente de correlação espacial que explique a radiação solar nos telhados tendo apenas em conta um conjunto de descritores de forma urbana. Para o efeito, foi criado um modelo solar, através da ferramenta *Solar Analyst* do ArcGIS e calibrada através da ferramenta PVGIS. Como um dos objetivos deste trabalho é a criação de um modelo que possa ser utilizado em qualquer cidade, este estudo foi aplicado na cidade de Lisboa, baseado na heterogeneidade do seu edificado. Comparando os valores de radiação obtidos através do modelo solar e do modelo de regressão linear com componente de correlação espacial, verificou-se um erro médio de 4%, concluindo-se assim que o modelo apresenta uma precisão aceitável.

**Palavras-Chave:** Potencial Solar, Morfologia Urbana, Sistemas de Informação Geográfica, Regressão Espacial, Modelo Solar.

## Abstract

Nowadays, cities present themselves as a good opportunity for energy production, with vast areas of rooftops and facades suitable for solar energy use. Nonetheless this use is highly influenced by the city's morphological characteristics. Therefore, it becomes necessary to study how the solar potential in a city varies, finding the most suitable areas in which to install solar power systems. Currently, complex algorithms are used to determine the solar potential with precision, requiring large computational capabilities. This study intends to present a simplified methodology to determine the solar potential, on a city's census divisions and with a preliminary character, by creating a linear regression model with spatial correlation that explains the solar radiation on rooftops through a set of urban morphology descriptors. For this purpose, a solar model was created, using ArcGIS' *Solar Analyst*, calibrated by PVGIS. As one of the goals of this work is to create a model that could be used in any city, this study was applied in the city of Lisbon, based on its building heterogeneity. By comparing the radiation values obtained through the solar model and the linear regression with spatial correlation model, it was concluded that the model presents an acceptable precision, with a mean error of 4%.

**Keywords:** Solar Potential, Urban Morphology, Geographic Information Systems, Spatial Regression, Solar Model

## Índice

Resumo.....	ii
Abstract .....	ii
Índice de Figuras .....	iv
Índice de Tabelas.....	vii
Agradecimentos.....	ix
Simbologia e Notações.....	x
Capítulo 1 – Introdução.....	1
Capítulo 2 – Contexto e Revisão Bibliográfica.....	4
2.1 Enquadramento .....	4
2.2 Potencial solar em meio urbano: Algoritmos e casos de estudo .....	10
2.3 Contribuição dos SIG .....	16
2.3.1 Tecnologia de aquisição de dados .....	16
2.3.2 SIG e métodos analíticos.....	17
Capítulo 3 – Descrição da área de estudo e da metodologia do trabalho .....	19
3.1 Escolha da área de estudo.....	19
3.2 Descrição dos dados usados .....	20
3.3 Caracterização espacial do meio urbano .....	21
3.3.1 Tipologia do edificado .....	23
3.3.2 Distribuição vertical do edificado .....	26
3.3.3 Uso do solo.....	30
3.3.4 Geometria do edificado .....	33
3.4 Modelo Solar .....	37
3.5 Análise de correlação espacial das variáveis em estudo .....	42
Capítulo 4 – Discussão.....	50
Capítulo 5 – Conclusões e Desenvolvimentos Futuros .....	59
Referências .....	62
Anexos.....	65

## Índice de Figuras

Figura 1 - Evolução do aumento da temperatura global (a) e Evolução das emissões de gases com efeito de estufa (c) (extraído de IPCC, (2015)).....	4
Figura 2 - Previsão das emissões antropogénicas de CO <sub>2</sub> em diversos cenários (a) e Previsão do aumento da temperatura em função das emissões de CO <sub>2</sub> (b) (IPCC, 2015).....	5
Figura 3 - <i>Mix</i> energético mundial (BP, 2018).....	6
Figura 4 - Crescimento (histórico e previsão) da produção de energia renovável, por tecnologia (IEA, 2017) .....	6
Figura 5 - <i>Mix</i> energético de Portugal em 2017 (APREN, 2018) .....	7
Figura 6 - Contribuição necessária das energias renováveis, por setor, para cumprir dos cenários de redução de emissões (IEA, 2017).....	8
Figura 7 - Distribuição mundial da irradiação global horizontal (Global Solar Atlas, 2016) .....	9
Figura 8 - Mapa do potencial solar fotovoltaico nos telhados (Gomes, 2011).....	10
Figura 9 - Metodologia para cálculo da radiação nos telhados (Redweik et al., 2013).....	11
Figura 10 - Metodologia para cálculo da radiação nas fachadas (Redweik al., 2013) .....	12
Figura 11 – Irradiação anual no campus da FCUL (Redweik et al., 2013).....	12
Figura 12 - Caracterização das áreas de estudo segundo o IDE e radiação global (a) Área boa; (b) Área menos boa, calculado pelo SOL (Guimarães, 2014) .....	14
Figura 13 - Mapeamento do potencial Solar na área de estudo (Sarralde <i>et al.</i> , 2015).....	15
Figura 14 - Funcionamento de um sistema ALS (Carneiro, 2011) .....	16
Figura 15 – Localização da área de estudo (freguesias realçadas) dentro do município de Lisboa. 19	
Figura 16 - Fluxograma da metodologia para determinação da tipologia do edificado .....	23
Figura 17 - Interface do <i>Summary Statistics</i> do ArcMap .....	24
Figura 18 - Proporção de apartamentos por BGRI.....	25
Figura 19 - Proporção de moradias geminadas por BGRI .....	25
Figura 20 - Proporção de moradias isoladas por BGRI.....	25
Figura 21 - Fluxograma do procedimento de criação do <i>buffer</i> e de atribuição da altura dos edifícios .....	26
Figura 22 - Interface da ferramenta <i>buffer</i> do ArcMap e exemplo de utilização na área de estudo (a verde os edifícios e a rosa o <i>buffer</i> de 2 metros).....	27
Figura 23 - Exemplo de imagem utilizada para o cálculo aproximado da altura dos edifícios (Imagem: Google Street View, Google, 2017) .....	28
Figura 24 - Valores normalizados de altura média dos edifícios por BGRI .....	29
Figura 25 - Valores normalizados de desvio padrão da altura média dos edifícios por BGRI.....	29
Figura 26 - Fluxograma do procedimento para determinação do uso do solo por BGRI.....	30

Figura 27 - Valores normalizados da área de cada BGRI .....	31
Figura 28 - Valores normalizados de área edificada total em cada BGRI .....	31
Figura 29 - Proporção de área coberta por edifícios em cada BGRI.....	31
Figura 30 - Proporção de área coberta por rede viária em cada BGRI.....	31
Figura 31 - Proporção de áreas verdes por BGRI .....	32
Figura 32 - Proporção de área coberta por estacionamento em cada BGRI .....	32
Figura 33 - Proporção de área coberta por outros tipos de pavimentos em cada BGRI.....	32
Figura 34 - Interface da ferramenta <i>Calculate Geometry</i> do ArcMap .....	33
Figura 35 - Interface da ferramenta <i>Add Geometry: Line Bearing</i> do ArcMap .....	34
Figura 36 - Fluxograma com o procedimento para a determinação orientação de cada edifício .....	34
Figura 37 - Valores normalizados do volume médio dos edifícios para cada BGRI .....	36
Figura 38 - Valores normalizados do perímetro médio dos edifícios para cada BGRI.....	36
Figura 39 - Valores normalizados da orientação média dos edifícios para cada BGRI .....	36
Figura 40 – Distribuição da radiação solar na área de estudo (incluindo telhados e terreno) (Valores de radiação anual expressos em Wh/m <sup>2</sup> ) .....	37
Figura 41 - Calibração do modelo solar .....	39
Figura 42 - Fluxograma com o processo de criação e calibração do modelo solar.....	40
Figura 43 - Ferramenta Area Solar Radiation ( <i>Solar Analyst</i> ) do ArcMap 10.4.....	41
Figura 44 - Valores de médios de radiação nos telhados, por subsecção estatística, expressos em kWh/m <sup>2</sup> /ano, de acordo com o modelo solar criado.....	41
Figura 45 - Relação da radiação com a altura média .....	42
Figura 46 - Relação da radiação com a Proporção de edifícios de apartamentos .....	42
Figura 47 - Fluxograma do procedimento de escolha do modelo de regressão linear a utilizar .....	44
Figura 48 - Interface de criação de pesos no <i>software</i> GeoDa .....	46
Figura 49 - Interface de criação dos modelos de regressão linear.....	47
Figura 50 - Distribuição espacial, por BGRI, dos valores estimados de radiação solar nos telhados na área de estudo, expressos em kWh/m <sup>2</sup> /ano .....	49
Figura 51 - Divisão da área de estudo em quatro subáreas (a e b) .....	53
Figura 52 - Valores de radiação nos telhados, obtidos pelo modelo solar (Valores em kWh/m <sup>2</sup> /ano) .....	56
Figura 53 - Valores de radiação nos telhados, obtidos pelo modelo de regressão linear (Valores em kWh/ m <sup>2</sup> /ano) .....	56
Figura 54 – Diferença (em módulo) entre valores de radiação obtidos pelo modelo solar e pelo modelo de regressão linear (Valores em kWh/ m <sup>2</sup> /ano).....	57
Figura 55 - Relação da radiação com a área das BGRI.....	65
Figura 56 - Relação da radiação com a área total edificada .....	65

Figura 57 - Relação da radiação com o desvio padrão da altura média .....	65
Figura 58 - Relação da radiação com a orientação média dos edifícios.....	66
Figura 59 - Relação da radiação com o perímetro médio.....	66
Figura 60 - Relação da radiação com o plot ratio.....	66
Figura 61 - Relação da radiação com a Proporção de área coberta por estacionamento .....	66
Figura 62 - Relação da radiação com a Proporção de moradias geminadas .....	66
Figura 63 - Relação da radiação com a Proporção de moradias isoladas.....	66
Figura 64 - Relação da radiação com a Proporção de área coberta por outros tipos de pavimentos	67
Figura 65 - Relação da radiação com a Proporção de áreas verdes.....	67
Figura 66 - Relação da radiação com a Proporção de área coberta por rede viária.....	67
Figura 67 - Relação da radiação com o volume médio .....	67
Figura 68 - Estudo da dependência espacial do volume médio.....	68
Figura 69 - Estudo da dependência espacial da Proporção de área coberta por rede viária .....	68
Figura 70 - Estudo da dependência espacial da Proporção de áreas verdes .....	68
Figura 71 - Estudo da dependência espacial da Proporção de área coberta por outros tipos de pavimento .....	68
Figura 72 - Estudo da dependência espacial da Proporção de moradias isoladas .....	68
Figura 73 - Estudo da dependência espacial da Proporção de moradias geminadas .....	68
Figura 74 - Estudo da dependência espacial da Proporção de área coberta por estacionamento....	69
Figura 75 - Estudo da dependência espacial da Proporção de edifícios de apartamentos .....	69
Figura 76 - Estudo da dependência espacial do plot ratio .....	69
Figura 77 - Estudo da dependência espacial do perímetro médio .....	69
Figura 78 - Estudo da dependência espacial da orientação média .....	69
Figura 79 - Estudo da dependência espacial do desvio padrão da altura média.....	69
Figura 80 - Estudo da dependência espacial da altura média.....	70
Figura 81 - Estudo da dependência espacial da área total edificada .....	70
Figura 82 - Estudo da dependência espacial da área da BGRI.....	70

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Descritores de morfologia urbana utilizados para estimar o potencial solar nas fachadas e nos telhados (Sarralde <i>et al.</i> , 2015) .....	15
Tabela 2 - Características dos dados utilizados.....	20
Tabela 3 - Descritores da morfologia urbana considerados no trabalho .....	21
Tabela 4 - Valores mensais do coeficiente de radiação difusa e de transmissividade utilizados na calibração do modelo solar.....	38
Tabela 5 - Análise da relação entre a radiação e os descritores de forma urbana .....	43
Tabela 6 - Resultados do modelo de regressão clássica.....	45
Tabela 7 - Principais resultados dos modelos de regressão.....	47
Tabela 8 - Resultados do modelo de regressão <i>spatial error</i> .....	48
Tabela 9 - Resultados do modelo de regressão linear clássico (Modelo simplificado).....	51
Tabela 10 - Resultados do modelo de regressão linear spatial error .....	52
Tabela 11 - Resultados da verificação da metodologia.....	53
Tabela 12 - Resultados da verificação do modelo.....	54
Tabela 13 - Comparação dos resultados entre o modelo base e o modelo simplificado .....	55
Tabela 14 - Cenários adicionais .....	58

*Aos meus Pais e à minha Avó*



## Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus orientadores, Professores Miguel Brito e Cristina Catita, por todos os dados que me forneceram, conhecimentos que partilharam comigo, opiniões, tempo despendido, apoio, confiança, motivação e paciência (mesmo quando desaparecia por uns tempos). Muito obrigado, sem eles nada disto seria possível.

Obrigado também à minha família e amigos pelo apoio e amizade ao longo dos anos e por me terem ajudado a tornar na pessoa que sou hoje.

Um abraço especial ao David, por todo o apoio, motivação, amizade e por me ter “dado na cabeça” ao longo deste processo e ao longo de todos estes (muitos e bons) anos.

Um agradecimento especial à Raquel, que ao entrar na minha vida me trouxe imensas coisas boas. Obrigado por não me deixares desistir, por toda a motivação, força, apoio, inspiração e revisão da tese e, como não poderia deixar de ser, por todo o amor.

E por último, mas nunca os últimos, aos meus pais, Aurélio e Ana Paula, por todo o amor e força desde o primeiro momento e por me terem proporcionado (com muito esforço) a hipótese de estar onde estou e ser o que sou hoje.

## Simbologia e Notações

$\lambda$	Coefficiente de correlação espacial dos erros
$R^2$	Coefficiente de determinação
ETRS 89	European Terrestrial Reference System 1989
CAOP	Carta Administrativa Oficial de Portugal
DGT	Direção Geral do Território
BGRI	Base Geográfica de Referenciação de Informação
INE	Instituto Nacional de Estatística
CML	Câmara Municipal de Lisboa
LiDAR	Light Detection And Ranging
ALS	Airborne Laser Scanning
MDT	Modelo Digital de Terreno
CIGeoE	Centro de Informação Geoespacial do Exército
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
PV	Fotovoltaico
GEE	Gases com Efeito de Estufa
HVDC	High Voltage Direct Current
BIPV	Building Integrated Photovoltaics
NZEB	Near-Zero Energy Buildings

## Capítulo 1 – Introdução

Segundo Aengenheyster *et al.*, 2018, o cenário mais pessimista aponta que em 2035 deixa de ser possível limitar a 2°C o aumento da temperatura global até 2100, resultando, assim, no não cumprimento do recente Acordo de Paris. (UNFCCC, 2015) Um aumento de 2°C é considerado atualmente como o limiar de temperatura a partir do qual os impactos do aquecimento global se tornam ainda mais devastadores, implicando a perda de biodiversidade, aumento significativo do nível médio do mar, maior frequência e intensidade de fenómenos meteorológicos extremos, entre outros. (Shaw, 2017) (IPCC, 2015)

A concretização deste cenário depende de alguns fatores como a penetração de energias renováveis. Um exemplo disso é o facto de um crescimento anual de 3 pontos percentuais das fontes de energias renováveis permitir adiar em 10 anos o alcance do ponto de não retorno (Aengenheyster *et al.*, 2018). Isto torna fundamental a tomada de atitudes e medidas que possam diminuir as emissões de gases com efeito de estufa, maximizando ao mesmo tempo a penetração de fontes de energias renováveis.

Uma das fontes de energia renovável com maior potencial é a energia solar (Hoogwijk e Graus, 2008) (IEA, 2017), podendo esta dar um enorme contributo à redução da emissão de GEE. É necessário avaliar, portanto, qual o seu potencial e áreas a instalar. É neste contexto que entra este estudo, que tem como principal objetivo estimar o potencial solar nos edifícios de uma cidade a partir de um conjunto de variáveis espaciais que descrevem a morfologia urbana. Com isto, pretende-se ajudar na tomada de decisões, facilitar e acelerar os estudos de potencial solar com vista a uma maior integração de sistemas de energia solar nas cidades, sejam eles térmicos ou fotovoltaicos

A elevada complexidade do meio urbano (a nível do edificado, obstáculos, sombras ou radiação) torna a determinação do potencial solar numa cidade numa tarefa muito complicada. Existem vários modelos de cálculo do potencial solar, desde os mais simples a 2D aos mais complexos a 3D, tal como apresentado em Freitas *et al.*, (2015). Algumas destas ferramentas, como o algoritmo SOL (Redweik *et al.*, 2013), exigem capacidades computacionais complexas e grandes volumes de dados, tornando estes estudos morosos e complexos.

Baseando-se num estudo que pretende estimar o potencial solar em Londres de Sarralde *et al.* (2015), pretende-se apresentar uma solução alternativa, e essencialmente mais simples e rápida, às ferramentas de cálculo do potencial solar, apresentando ainda assim valores aceitáveis. Através deste método pretende-se provar que não seja necessária uma grande inserção de dados nem de grandes capacidades de computação para o cálculo do potencial solar em meio urbano, pois este pode ser estimado, em cada divisão censitária, a partir de um conjunto de variáveis, que caracterizam a morfologia urbana em cada secção, e pela aplicação de um modelo de regressão linear simples.

Com este trabalho pretende-se fazer desenvolver uma metodologia semelhante à de Sarralde *et al.* (2015), para definir um modelo linear simples baseado em variáveis espaciais que caracterizam a morfologia da cidade de modo a estimar o potencial solar apenas nos telhados dos edifícios. Pretende-se assim, com este trabalho, abrir portas a um estudo mais exaustivo, que incluirá também as fachadas dos edifícios, já que representam um dos tópicos mais importantes na temática do potencial solar. Pretende-se, ainda, que esta metodologia possa ser aplicada futuramente a toda a cidade de Lisboa ou mesmo a outras cidades, estimando o potencial solar com níveis de aceitação razoáveis, quando o detalhe é compatível com a escala de uma cidade.

Depois de determinado o modelo para estimar o potencial solar, será possível cumprir o objetivo secundário deste projeto, que é o de mapear o potencial solar na área de estudo.

Para isto serão executadas as seguintes etapas:

1. **Escolha da área de estudo** – Compreende 3 freguesias de Lisboa (Areeiro, Avenidas Novas e Alvalade), escolhidas de acordo com uma amostragem de heterogeneidade de edificado nesta cidade;
2. **Escolha dos descritores de forma urbana** – Adaptação dos parâmetros de morfologia urbana descritos em Sarralde, 2015, divididos em grupos (tipologia do edificado, distribuição vertical do edificado, uso do solo e geometria do edificado);
3. **Cálculo e mapeamento dos descritores** – Recorrer-se-á a ferramentas de informação geográfica, entre outras, que permitam calcular os diferentes descritores e, mapeá-los para cada BGRI, permitindo compará-los visualmente e assim determinar quais os parâmetros mais importantes;
4. **Análise da autocorrelação espacial entre os descritores e a radiação solar** – Recurso a diferentes testes estatísticos de modo a analisar qual a relação entre os parâmetros escolhidos e a radiação solar;
5. **Criação do modelo de regressão linear** – Criação modelos de regressão linear, com e sem componente espacial, que permitam um melhor ajuste aos dados;
6. **Validação dos resultados** – Comparação entre os dados obtidos pelo modelo solar e pelo modelo de regressão linear escolhido.

Para o cálculo dos diferentes descritores de forma urbana e criação do modelo solar recorrer-se-á a algumas camadas de informação geográfica, disponibilizadas em fontes de domínio público e que se encontram tanto em formato *raster* como em formato vetorial, sendo que todas elas estão ou serão reprojatadas no sistema de coordenadas PT-TM06/ETRS89. (DGT, 2006)

A maior parte do processamento destes dados, como a determinação dos parâmetros e do modelo solar, será realizado com recurso ao *ArcMap* 10.4 do *ArcGIS* (ESRI, 2016). Para a análise de autocorrelação espacial, criação dos modelos de regressão linear e análise estatística, será utilizado o *GeoDa* (versão 1.6.7) (Anselin *et al.*, 2006). Para auxiliar a determinação de parâmetros ligados à tipologia e distribuição vertical do edificado, recorrer-se-á a imagens do *Street View* e *Google Earth* da *Google* e às capacidades SQL do *Microsoft Access*.

Tal como já foi referido anteriormente, os métodos para calcular o potencial solar numa cidade (tendo em conta os telhados e as fachadas dos edifícios) são geralmente dispendiosos ao nível das capacidades computacionais.

O principal interesse deste trabalho é o de criar um método que permita estimar o potencial solar sem ser necessária a utilização de um modelo solar, sendo esta a componente do trabalho que envolve mais recursos computacionais. Nesta dissertação, o modelo solar serve apenas para estudar a correlação entre a morfologia urbana e a radiação e assim criar um modelo matemático, sendo este o único modelo a utilizar numa posterior aplicação para estimar o potencial solar numa cidade.

A metodologia deste trabalho permite estimar o potencial solar, apenas nos telhados, recorrendo apenas a um conjunto de descritores de morfologia urbana que, devidamente combinados num modelo linear simples podem ser uma solução alternativa ao uso de um modelo complexo de cálculo de potencial solar.

Sendo que a principal inovação deste trabalho prende-se com a apresentação de uma metodologia mais rápida e simples para estimar o potencial solar em meio urbano, este trabalho pode ajudar na identificação de áreas favoráveis a um posterior estudo mais detalhado.

No capítulo 2 deste trabalho, pretende-se fazer um breve contexto sobre as temáticas essenciais deste estudo: energia solar, morfologia urbana e regressões lineares. Além disso, será feita uma revisão bibliográfica na área, onde se apresentam alguns estudos de cálculo do potencial solar.

No capítulo 3, será explicada a metodologia do trabalho. Em primeiro lugar, apresentam-se as razões da escolha da área de estudo e depois o modo como foram determinados os parâmetros escolhidos e como foi criado o modelo solar. Em segundo lugar, o trabalho debruça-se sobre a análise correlação espacial entre os descritores e a radiação, terminando na criação dos modelos de regressão linear.

Já no capítulo 4, será realizada a discussão dos resultados obtidos pelos modelos solar e de regressão linear, incluindo a comparação dos erros entre os dois modelos. Discutir-se-ão ainda estratégias para a simplificação e refinação do modelo de regressão linear. Por fim far-se-á ainda uma pequena simulação do consumo e produção de energia elétrica na área de estudo tendo em conta os resultados obtidos.

Por último, no capítulo 5, serão apresentadas as conclusões que se retiram deste estudo assim como algumas ideias para a continuação e aperfeiçoamento deste trabalho no futuro.

## Capítulo 2 – Contexto e Revisão Bibliográfica

### 2.1 Enquadramento

Desde a Revolução Industrial, o Homem tornou-se mais dependente dos combustíveis fósseis, fruto do elevado desenvolvimento tecnológico. Primeiramente baseado no carvão e depois com o petróleo, dois dos combustíveis mais poluentes, este desenvolvimento teve fortes consequências para a humanidade.

Associada à queima de combustíveis fósseis, está a libertação de gases como efeito de estufa (GEE), como o Dióxido de Carbono e o Metano, sendo estes responsáveis por um dos flagelos mais atuais da humanidade: o aquecimento global e as alterações climáticas.

A partir do momento em que a Natureza não consegue lidar com esses valores elevados, através dos sumidouros naturais de carbono, como as florestas e os oceanos, dá-se a acumulação de GEE na atmosfera, provocando o aumento da temperatura e, por sua vez, alterações nos padrões climáticos globais, com fortes prejuízos para a vida no planeta.

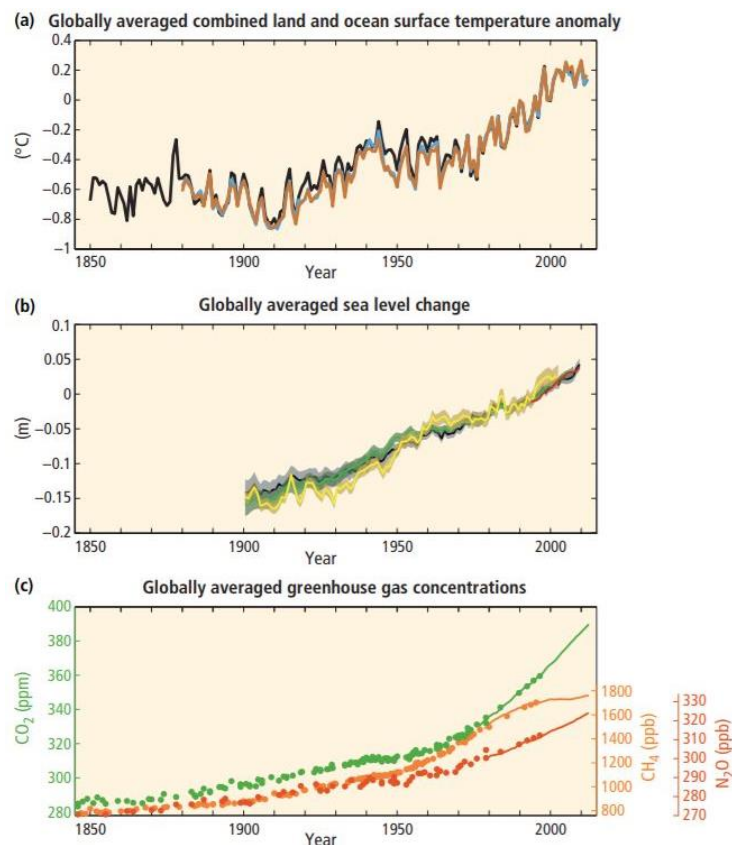


Figura 1 - Evolução do aumento da temperatura global (a) e Evolução das emissões de gases com efeito de estufa (c) (extraído de IPCC, (2015))

Na Figura 1 é possível verificar a relação entre as das concentrações de diferentes gases com efeito de estufa. Verifica-se desde o início da Revolução Industrial, um crescimento dos valores da temperatura e da emissão de gases, notando-se ainda que este aumento foi acentuado no último século. Estima-se que o aumento da temperatura tenha atingido os 0,93°C acima dos valores de meados do século XIX, estando atualmente a crescer a um ritmo de 0,2°C por década (Millar, 2017). Ao mesmo tempo, dados do IPCC, mostram que se está perante uma aceleração nas emissões de

CO<sub>2</sub>: Entre 1970 e 2000, as emissões de CO<sub>2</sub> aumentaram 1,3%/ano, atingindo um aumento anual de 2,2% no período entre 2000-2010 (IPCC, 2015).

De modo a tentar reverter a situação, foram criados acordos internacionais direcionados para a questão das emissões e consequências das alterações climáticas, como é o caso do Protocolo de Quioto (1997) e, mais recentemente, o Acordo de Paris.

Este último acordo, assinado em 2016, por 195 países, é um bom exemplo que demonstra a motivação de efetuar algumas mudanças no futuro, colmatando o aquecimento global, uma vez que estipula um valor máximo de gases que podem ser emitidos por cada um dos países.

Atendendo às provas que os cientistas têm apresentado relacionando as consequências do aumento da temperatura com as alterações climáticas, o principal objetivo do Acordo de Paris é manter o aumento da temperatura média global abaixo dos 2°C, acima dos valores da era pré-industrial, limitando o aumento da temperatura a 1,5°C. Mantendo estas indicações diminui-se significativamente os riscos e impactos das alterações climáticas, sendo que foi estipulado que os países devem adotar medidas para esse fim. (UNFCCC, 2015)

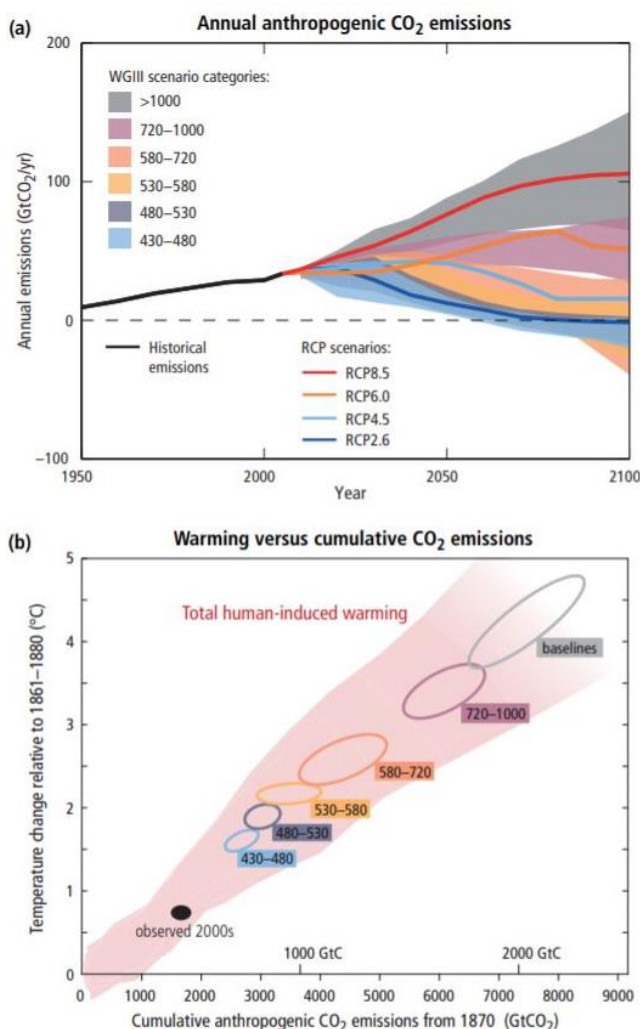


Figura 2 - Previsão das emissões antropogénicas de CO<sub>2</sub> em diversos cenários (a) e Previsão do aumento da temperatura em função das emissões de CO<sub>2</sub> (b) (IPCC, 2015)

Tal como já foi mencionado no capítulo 1, novos estudos mostram que o ponto de não retorno, ou seja, a partir do momento em que se torna impossível atingir o objetivo de limitar o aquecimento do planeta a 2°C no ano de 2100, pode estar mais próximo do que anteriormente se pensava. Segundo o

cenário mais dramático em Aengenheyster *et al.* (2018), se o crescimento das energias renováveis se situar nos 2% ao ano, esse ponto de não retorno pode já acontecer em 2035. No entanto, é também apresentado um cenário mais favorável, baseando-se, para isso, num maior crescimento das energias renováveis. Neste cenário, conclui-se que caso o crescimento seja de cerca de 5% ao ano, é possível adiar em pelo menos uma década o ano em que se atinge o ponto de não retorno. Esta ambição exige uma aposta urgente nas fontes de energia renovável.

É neste contexto, aliado a um mundo cada vez mais tecnológico e sedento de energia, que surge a importância das energias renováveis.

Tal como mostra a Figura 3, tem-se verificado nos últimos tempos uma aposta cada vez mais na produção de energia a partir de fontes renováveis, limpas e com recursos endógenos e inesgotáveis, ao mesmo tempo que se reverte a produção de energia elétrica a partir de combustíveis fósseis.

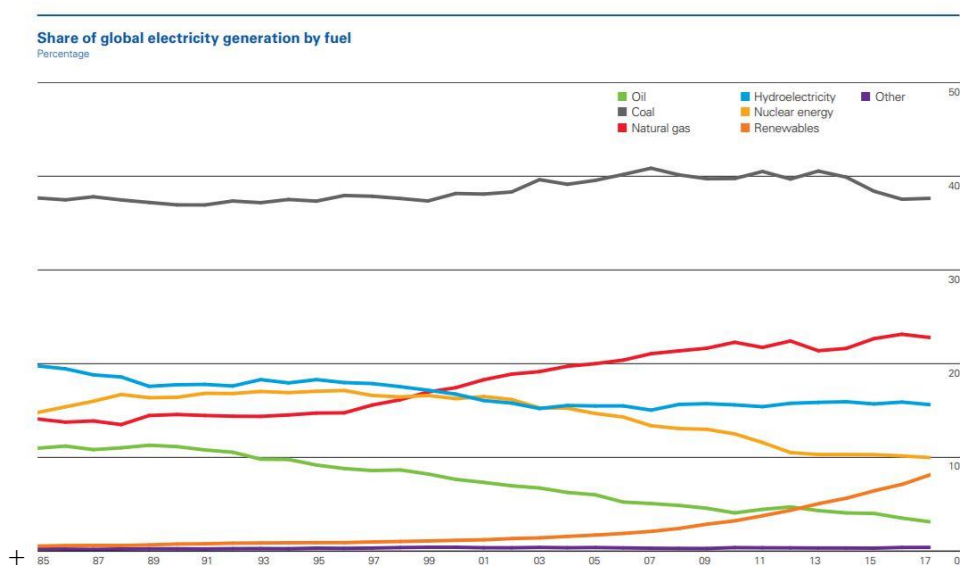


Figura 3 - Mix energético mundial (BP, 2018)

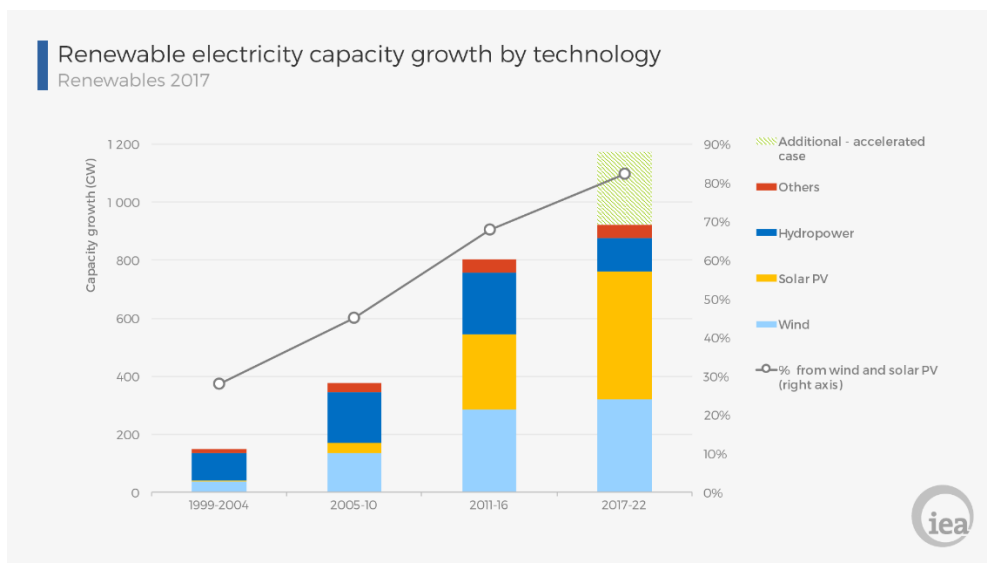


Figura 4 - Crescimento (histórico e previsão) da produção de energia renovável, por tecnologia (IEA, 2017)



Na última década, as energias renováveis têm apresentado um rápido crescimento, apesar de atualmente ainda só representarem 8,4% do mix energético mundial. Segundo a IEA (Figura 4), este paradigma de crescimento das energias renováveis tem estado dominado pela energia eólica. A mudança neste paradigma já está a ser efetivada, tendo sido verificado um crescimento anual de 16% na energia solar fotovoltaica no período entre 2006 e 2016 (BP, 2018). Estima-se ainda, que num futuro próximo o crescimento e investimento na energia solar, e em especial do PV, seja ainda maior, associado a uma redução nos custos e também ao aumento da eficiência dos equipamentos.

Um dos exemplos de forte investimento nas energias renováveis é Portugal, onde em 2017, foi possível assegurar que 42% da produção provinha de fontes renováveis, diminuindo assim a dependência do país de combustíveis fósseis e as emissões de GEE. Na Figura 5, é possível notar, no entanto, que o solar tem ainda pouca expressão no paradigma energético nacional, representando apenas 1,5% de toda a energia produzida.

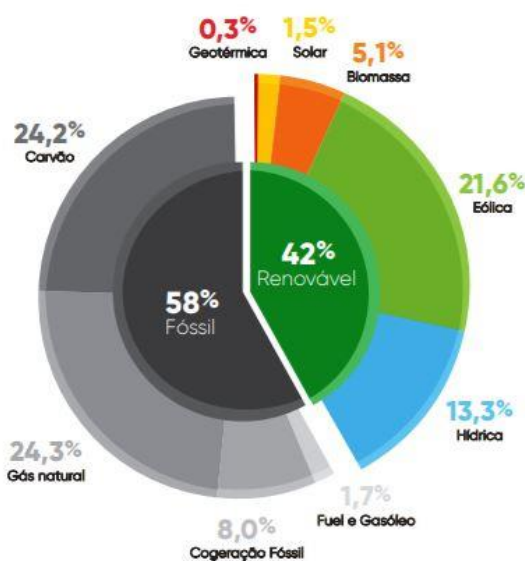


Figura 5 - *Mix* energético de Portugal em 2017 (APREN, 2018)

Recentemente, tem-se verificado uma forte aposta neste tipo de energia, com o licenciamento de diversas centrais solares em todo o país e com a ambição do Governo em triplicar até 2020 a produção de energia solar (Governo Português, 2018).

Apesar deste esforço para diminuir o impacto da produção de energia nas emissões de gases, existem ainda outros setores nos quais é necessária a procura e aplicação de outras estratégias para diminuir ainda mais a queima de combustíveis fósseis e, conseqüente, as emissões poluentes.

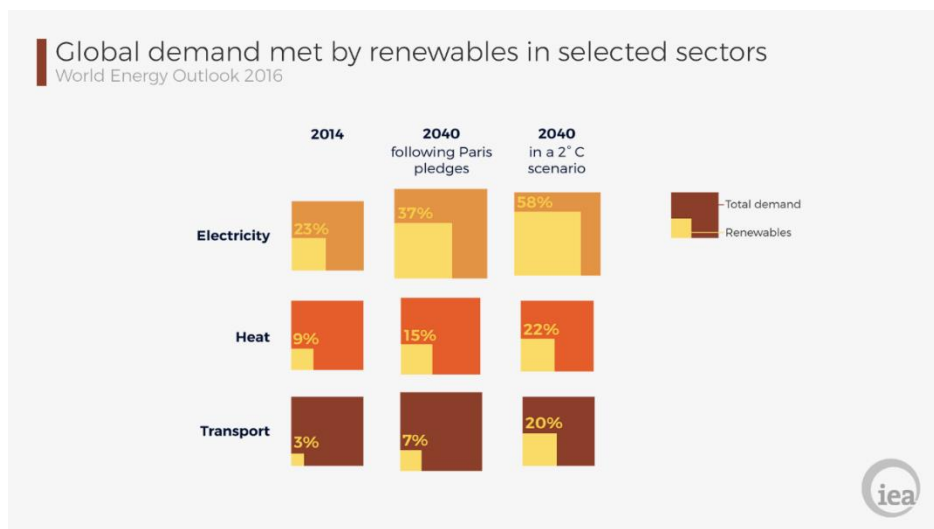


Figura 6 - Contribuição necessária das energias renováveis, por setor, para cumprir dos cenários de redução de emissões (IEA, 2017)

A seguir à geração de energia, o setor que mais contribui para esta problemática é o dos transportes. Apesar de se ter verificado uma melhoria neste sentido, com o aparecimento dos carros elétricos, ainda existe um grande potencial de crescimento, tal como foi estimado pela IEA (Figura 6).

Ao promover-se a mobilidade elétrica, vai aumentar a pressão sobre a demanda de energia elétrica, tornando-se essencial um maior desenvolvimento das energias renováveis, de modo a colmatar este aumento na procura. Só a utilização de energias limpas e abundantes permitem lidar com este aumento do consumo, ao mesmo tempo que contrariam todos os problemas já referidos.

Uma das melhores apostas para potenciar a produção de energia a partir de fontes renováveis é o aproveitamento da energia proveniente do sol. A Terra recebe, continuamente, cerca de 173000 TWh de energia vinda do sol, o suficiente para suprir mais de 10000 vezes o consumo de energia. Por esta razão é a energia renovável com maior potencial. A título de exemplo, caso fossem cobertos 10% dos desertos (cerca de 1,5% da área total do planeta), seria possível produzir 15TWh de energia elétrica, sem emitir gases poluentes. (MIT, 2011).

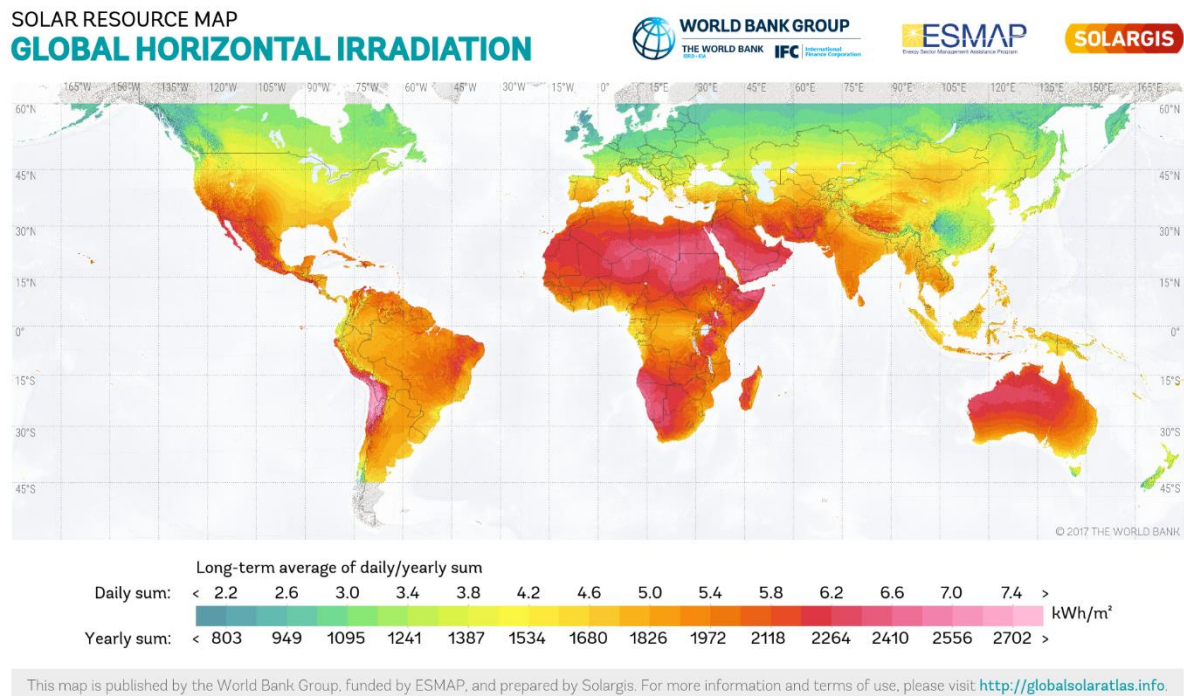


Figura 7 - Distribuição mundial da irradiação global horizontal (Global Solar Atlas, 2016)

No entanto, 75% da energia mundial é consumida nas cidades (Martins *et al.*, 2016), e, estes grandes centros de consumo não se situam nos desertos, o que implica a instalação de longas linhas de transmissão, como é o caso das HVDC. É vantajosa, então, a aproximação da produção de energia do seu consumo, ao transformar as cidades em centrais elétricas descentralizadas.

As cidades apresentam um enorme potencial, não só por tornar possível a diminuição das perdas no transporte, mas também na extensa área disponível para produzir energia, como são os casos dos telhados, fachadas e até dos parques de estacionamento.

As cidades podem ser definidas pela sua forma, sendo que esta está intimamente relacionada com o potencial solar. É fundamental analisar esta relação para assim ser possível maximizar o aproveitamento da radiação solar, permitindo delinear quais os melhores locais para a instalação de sistemas solares ou para abrir portas ao melhor planeamento de novas zonas edificadas. (Martins *et al.*, 2016)

## 2.2 Potencial solar em meio urbano: Algoritmos e casos de estudo

Em Martins *et al.* (2016) são apresentados vários estudos que mostram que a morfologia urbana pode ter um papel crucial tanto no consumo, como na produção de energia nas cidades.

Freitas *et al.* (2015) faz uma análise de vários métodos de determinação do potencial solar. Nesta parte do trabalho, vão ser analisados alguns dos métodos mais promissores ou utilizados, assim como vão ser apresentados alguns casos de estudo.

Uma das ferramentas mais utilizadas e simples para calcular o potencial solar é o *Solar Analyst* (Fu e Rich, 2000). É uma ferramenta presente no ArcMap do ArcGIS (ESRI, 2016) que permite calcular a radiação solar a 2D, recorrendo a um Modelo Digital de Superfície (MDS) ou Modelo Digital de Terreno (MDT) e a uma série de parâmetros meteorológicos, que podem ser alterados de forma a melhor representar a radiação num certo local. Utiliza, ainda, a latitude do MDS/MDT para, assim, melhor representar a radiação naquele local.

Esta ferramenta tem dois métodos de calcular a radiação: *Point Solar Radiation* e o *Area Solar Radiation*. Tal como os nomes indicam, o primeiro pretende calculá-la num ponto e, o segundo, numa certa área.

Por ser uma ferramenta mais acessível, este modelo é a base de vários trabalhos, como por exemplo, Gomes, 2011, entre outros.

Em Gomes, 2011, é apresentada uma metodologia para estimar o potencial solar fotovoltaico nos telhados, utilizando para isso dados LiDAR (Figura 8). Usando estes dados e a ferramenta do ArcGIS, foi criado um modelo solar, cujos valores foram calibrados pelo PVGIS (Suri *et al.*, 2005), reduzindo a 1% a diferença entre estas duas ferramentas. Para calcular o potencial solar, é considerada uma eficiência dos módulos de 12%. De referir que estes dois pontos são replicados no presente estudo.

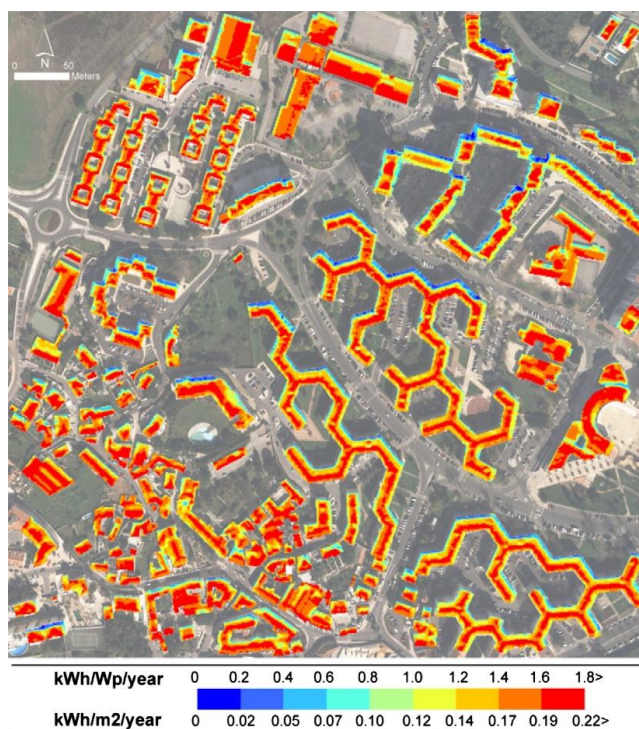


Figura 8 - Mapa do potencial solar fotovoltaico nos telhados (Gomes, 2011)

O SOL (Redweik *et al.*, 2013) é um modelo que permite calcular e visualizar o potencial solar em edifícios, tendo em conta, tanto telhados como fachadas. É um modelo 3D que utiliza como *input* o modelo digital de superfície (MDS) criado a partir de um levantamento LiDAR (*Light Detection And Ranging*) e de dados meteorológicos da base de dados do SOLTERM (Aguar, 1998).

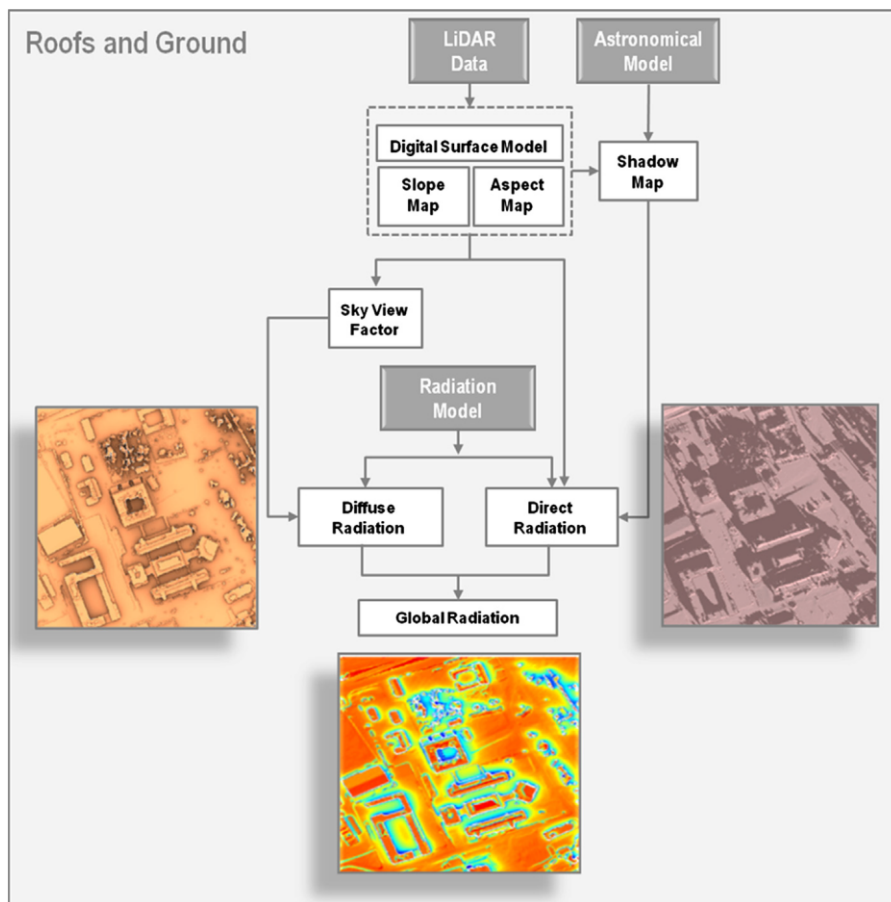


Figura 9 - Metodologia para cálculo da radiação nos telhados (Redweik *et al.*, 2013)

Os resultados deste modelo apresentam um grande detalhe decorrente da resolução dos dados LiDAR, uma vez que estes são apresentados na mesma grelha (1m x 1m). Uma das características fundamentais deste modelo é ter em conta as sombras provocadas por outros edifícios ou obstáculos, como árvores, aumentando a sua exatidão. Uma das vantagens proveniente do elevado detalhe espacial e quantidade de dados é a de poder ser feita uma análise caso a caso, como por exemplo, nas fachadas, ou mesmo nos telhados, escolhendo quais as áreas fundamentais, uma vez que essa visualização é simples de ser feita. Este modelo, criado em ambiente MatLab, implica a utilização de ferramentas computacionais complexas (supercomputadores ou clusters de computadores), uma vez que os seus cálculos são muito exaustivos. Isto torna o modelo moroso e complexo, dependendo, ainda mais, da extensão da área de estudo. De modo a testar o modelo, este foi aplicado a uma área relativamente pequena, limitada ao campus da FCUL em Lisboa.



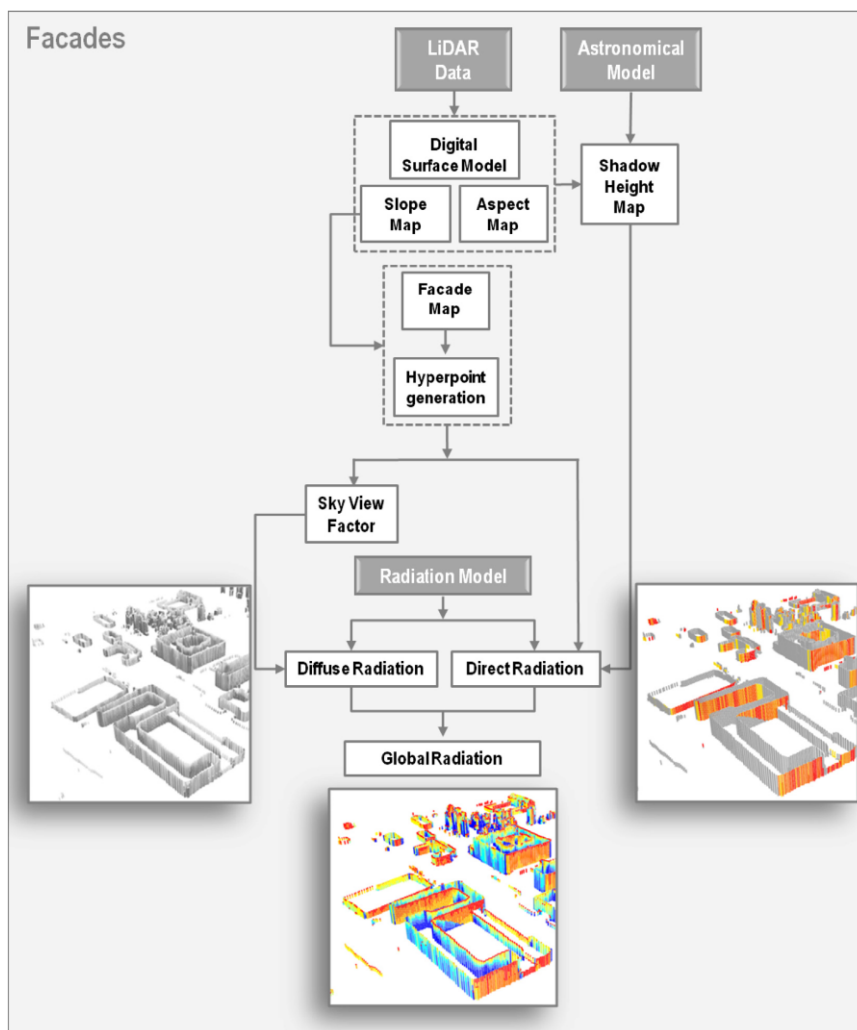


Figura 10 - Metodologia para cálculo da radiação nas fachadas (Redweik al., 2013)

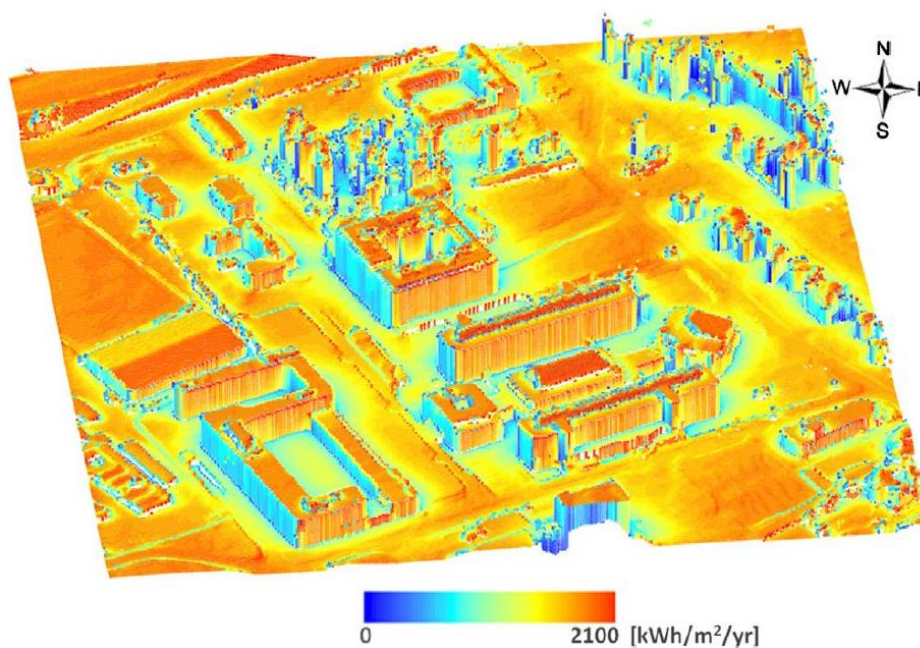


Figura 11 – Irradiação anual no campus da FCUL (Redweik et al., 2013)

Este facto faz com que este modelo não seja vantajoso para grandes áreas, uma vez que seria necessário bastante tempo de computação. Assim sendo, uma das estratégias para colmatar esta desvantagem é fazer uma análise prévia das melhores áreas a serem estudadas, mais detalhadamente, tal como feito em Guimarães (2014).

Em Guimarães (2014) é feita uma primeira relação entre alguns descritores de forma urbana e a radiação solar. É assumido, no início, que o potencial solar mais elevado seria nas áreas que apresentassem melhor IDE (Índice de Densidade do Edificado). É pertinente referir que este estudo é realizado na mesma área de estudo que esta dissertação. Este indicador relaciona, ao nível das subsecções estatísticas, a altura média do edificado com a proximidade entre edifícios, tal como é mostrado na Equação 1.

$$IDE = \frac{\% \text{ de área dos edifícios na subsecção}}{\text{altura média dos edifícios na subsecção}} \quad [1]$$

A proporção de área ocupada pelos edifícios numa BGRI permite averiguar a densidade urbana, indicando que em subsecções estatísticas com maior área edificada, existe maior ocupação do solo, ou seja, os edifícios estão mais próximos (e, por conseguinte, ruas mais estreitas).

O IDE permite então classificar as áreas em estudo, consoante o valor deste indicador, em áreas “boas” e “menos boas”. Nas subsecções estatísticas com menor altura média e maior área ocupada por edifícios (edifícios mais próximos), o valor do IDE é maior, logo é considerada uma zona “menos boa”. As áreas “boas” são aquelas em que o valor do IDE é menor, ou seja, menor densidade urbana.

Para verificar a influência deste indicador no potencial solar, foram escolhidas duas áreas com valores distintos de IDE: área a) com bom IDE e b) com mau IDE. Após a seleção destas amostras foi calculado, para cada uma delas, o potencial solar, tendo em conta as fachadas e os telhados dos edifícios, recorrendo à ferramenta SOL.

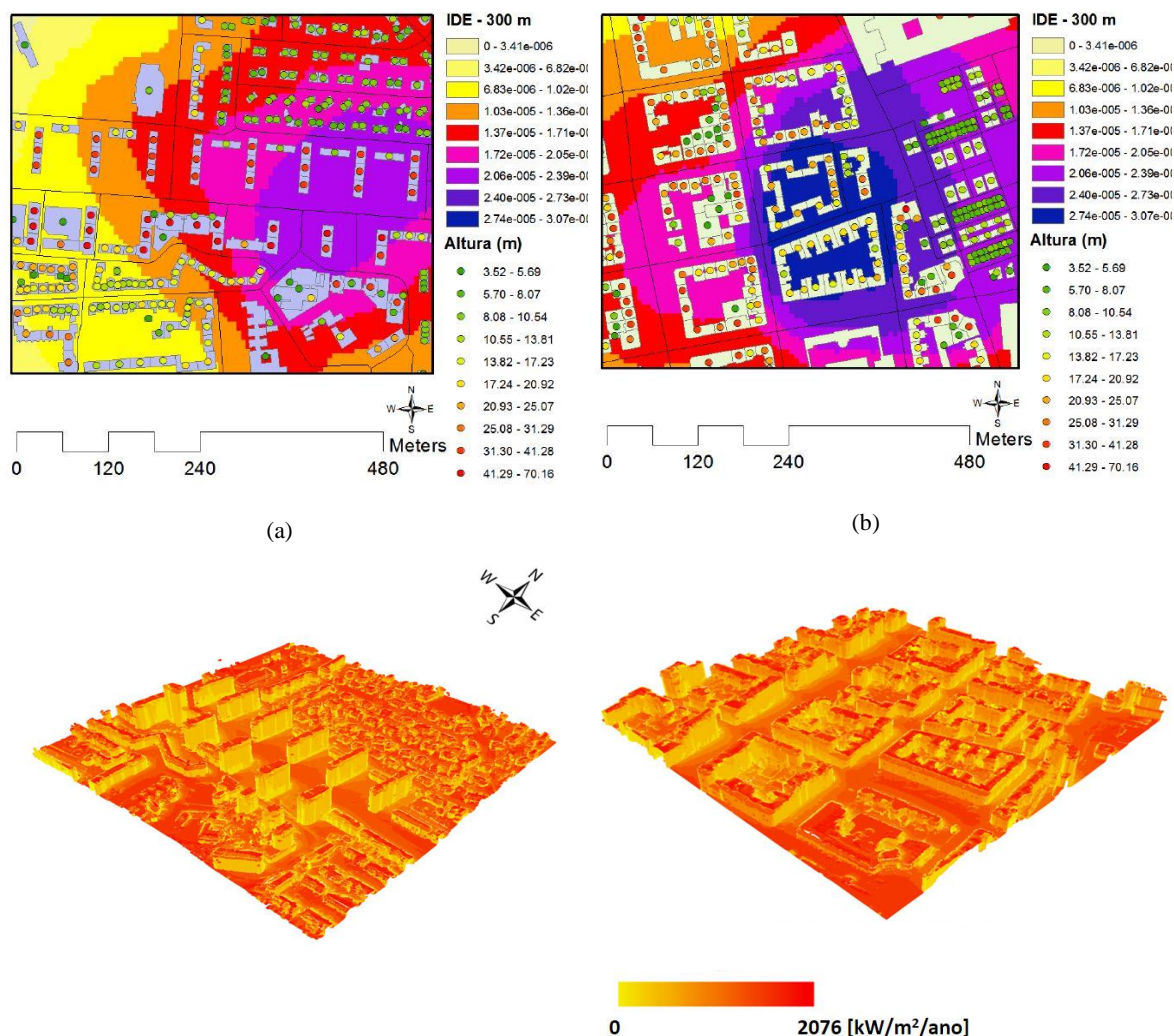


Figura 12 - Caracterização das áreas de estudo segundo o IDE e radiação global (a) Área boa; (b) Área menos boa, calculado pelo SOL (Guimarães, 2014)

Este trabalho permitiu concluir que o IDE permite delimitar, de uma melhor forma, as áreas para um estudo mais detalhado. Tal como se esperava, as áreas com menor IDE apresentam os melhores valores de potencial solar, verificando-se, ainda, que os telhados conseguem suprir as necessidades do consumo. No entanto, em termos anuais, verifica-se que a contribuição das fachadas é superior à dos telhados e que, por exemplo, no Inverno, as melhores fachadas (viradas a sul) são necessárias para suprir as necessidades energéticas.

Em Sarralde *et al.*, (2015), o autor cria um modelo estatístico que relaciona os parâmetros de morfologia urbana com o potencial solar, sendo que no final, estima-o na cidade de Londres.

Este estudo é realizado também ao nível das subsecções estatísticas de uma parte da área metropolitana de Londres e tem em conta tanto as fachadas como os telhados dos edifícios. Um dos objetivos deste trabalho é, ao analisar a relação entre o potencial solar e a morfologia da cidade, encontrar estratégias que permitam a maximização da radiação solar. No estudo, os autores concluíram que ao serem otimizados conjuntos de até 8 parâmetros (apresentados na Tabela 1) consegue-se aumentar a radiação solar nos telhados e nas fachadas em cerca de 9% e 45%



respetivamente. Esta informação torna-se fundamental em projetos de planeamento territorial, de modo a potenciar a integração das energias renováveis no meio urbano, em especial a solar.

Tal como nesta dissertação, estes autores criaram modelos solares que, posteriormente, são relacionados com os parâmetros de morfologia urbana, através de modelos de regressão múltipla com correlação espacial (*spatial error*). Para os telhados foram utilizados 6 parâmetros e para as fachadas apenas 3 dos 18 parâmetros originalmente em estudo, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Descritores de morfologia urbana utilizados para estimar o potencial solar nas fachadas e nos telhados (Sarralde *et al.*, 2015)

Roof-SolREP	Façade-SolREP
1) Share of semi-detached houses	1) Average building height
2) Share of area covered by private gardens	2) Site coverage
3) Average building perimeter	3) Average distance between buildings
4) Standard deviation of building heights	
5) Plot ratio	
6) Average distance between buildings	

Validando os valores de radiação calculados pelo modelo de regressão com os do modelo solar, verifica-se uma grande consistência na estimativa da radiação, com erros médios de 0,84% para os telhados e 8,05% para as fachadas (0,83% vs. 9,43% desvio padrão para telhados e fachadas, respetivamente).

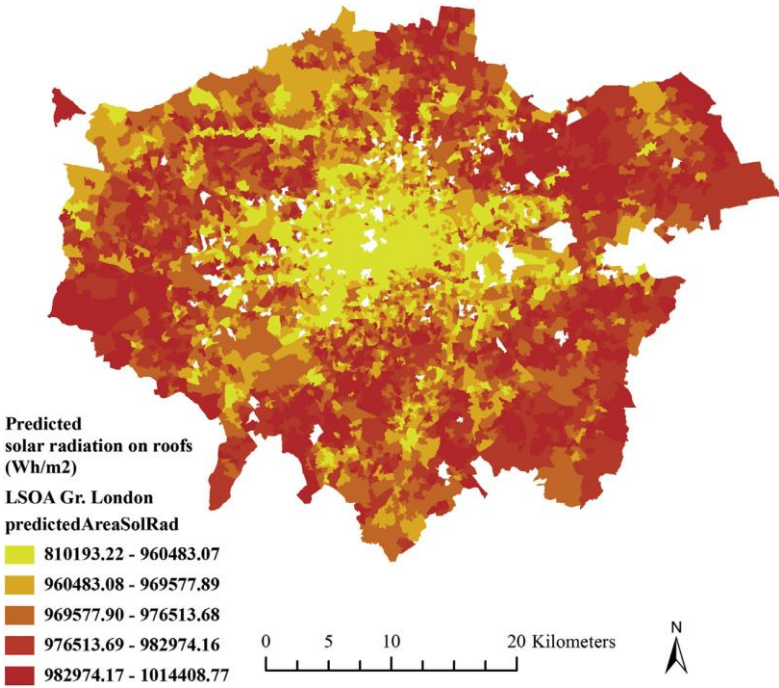


Figura 13 - Mapeamento do potencial Solar na área de estudo (Sarralde *et al.*, 2015)

Tendo em conta os estudos acima apresentados, é possível concluir que os descritores de forma urbana têm um papel preponderante na análise e determinação do potencial solar numa cidade, uma vez que se apresentam como o fator limitante à chegada da radiação à superfície.

## 2.3 Contribuição dos SIG

### 2.3.1 Tecnologia de aquisição de dados

Nos estudos referidos, uma das características fundamentais é a utilização de um Modelo Digital de Terreno ou de Superfície. Uma das técnicas mais usuais para a aquisição de dados que permitem a elaboração destes modelos é o levantamento LiDAR (*Light Detection And Ranging*) (Redweik *et al.*, 2013; Gomes, 2011). Este sistema permite adquirir, com extrema precisão e detalhe espacial, dados altimétricos devidamente georreferenciados. Estes dados incluem qualquer objeto captado pelo sensor, sejam eles edifícios, terreno ou vegetação.

A tecnologia LiDAR funciona através do varrimento da superfície terrestre por um laser de alta precisão, criando assim uma nuvem de pontos. Ao medir o tempo entre a emissão e posterior receção do sinal, uma vez que este é refletido pela superfície, é possível calcular a distância entre a plataforma onde o sistema está instalado e a superfície.

Associado ao sistema LiDAR, estão sistemas auxiliares que permitem não só calcular a distância como também georreferenciar a informação, facto bastante relevante neste tipo de levantamento. Para isso, são ligados ao sistema laser unidades de controlo e de posicionamento. A unidade de posicionamento utiliza dois sistemas de navegação: Inercial (INS) e Posicionamento Diferencial Global por Satélite (DGPS). O primeiro sistema regista as alterações na atitude e velocidade da plataforma, enquanto que o segundo permite calcular com elevada precisão (10 cm) a diferença entre a posição da plataforma em relação a um recetor no solo, determinando com exatidão a localização da plataforma, de modo a poder georreferenciar os dados.

Normalmente, o sistema LiDAR é instalado em plataformas aéreas (ALS - *Airborne Laser Scanning*), como aviões ou helicópteros, conseguindo assim varrer extensas áreas (Carneiro, 2011).

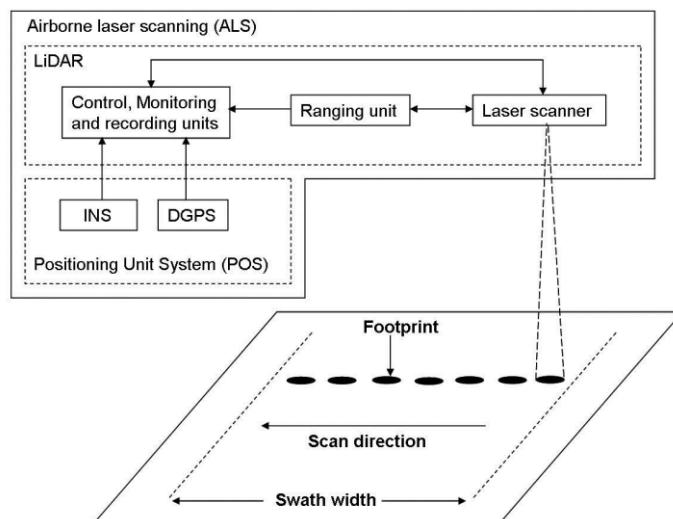


Figura 14 - Funcionamento de um sistema ALS (Carneiro, 2011)

### 2.3.2 SIG e métodos analíticos

Os Sistema de Informação Geográfica (SIG) são fundamentais ao cálculo e representação do potencial solar, pois permitem trabalhar geograficamente os dados, ou seja, projetados num determinado sistema de coordenadas. Além disso, permitem trabalhar grandes volumes de dados e têm muitas outras ferramentas essenciais no tratamento e análise destes dados, em particular na aplicação de modelos de cálculo de potencial solar.

Os SIG têm três fases essenciais: determinação do problema, aquisição de dados relativos aos mesmos e a análise desses mesmos dados.

No presente estudo, toda a análise e tratamento dos dados foi feita em ambiente ArcMap do ArcGIS (ESRI, 2016).

Outra das ferramentas essenciais neste trabalho consiste no *software* que permite obter os modelos de regressão espacial, neste caso, o GeoDa.

A regressão linear permite modelar a relação entre uma variável dependente, que se quer determinar, e uma ou mais variáveis independentes. Esta modelação é obtida pela Equação 2.

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad [2]$$

Nesta expressão Y é a variável dependente, X representa a matriz das variáveis independentes,  $\beta$  o vetor com os coeficientes de regressão e  $\varepsilon$  o termo do erro ou resíduos.

Normalmente, no caso dos dados com componente espacial, a regressão linear não traduz corretamente a relação entre as variáveis dependentes e independentes, uma vez que estas estão espacialmente autocorrelacionadas, isto é, observações mais próximas têm maior probabilidade de serem similares do que observações mais distantes.

A autocorrelação espacial das variáveis, que compara o valor das variáveis com os valores noutras localizações, tendo em conta o valor e a sua localização, pode ser estudada através de vários métodos, nomeadamente:

- Multiplicador de Lagrange: Analisa a dependência espacial entre a variável dependente e as independentes;
- Indicador de Moran: Avalia a correlação espacial;

$$I = \frac{N}{W} \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad [3]$$

Onde N é o número de áreas, W a soma dos elementos da matriz normalizada de proximidade espacial,  $w_{ij}$  os elementos da matriz normalizada de proximidade espacial,  $x_i$  o valor do atributo na área i e  $\bar{x}$  o valor médio do atributo na região de estudo;

- Log likelihood (função de verossimilhança): Verifica a existência de efeitos espaciais.

Um dos testes mais importantes é o Indicador de Moran que consiste na comparação do valor de uma variável em qualquer ponto com o valor em todos os outros pontos. Este indicador pode ser global ou local, sendo que o primeiro permite verificar se existe autocorrelação, enquanto o segundo determina onde se verifica essa autocorrelação, ou seja, onde se verificam *clusters* de um certo valor. Este índice varia entre -1 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1 (ou -1) maior será a autocorrelação espacial positiva (ou negativa).

A regressão espacial pode ser feita com recurso a dois modelos:

1. *Spatial Lag*: neste modelo é feita uma média dos valores na vizinha de um local, em que  $\rho$  e  $\beta$  parâmetros e  $\varepsilon$  vetor do erro:

$$Y = \rho W + X\beta + \varepsilon \quad [4]$$

2. *Spatial Error*: neste modelo é incluído um termo de erro autorregressivo, em que  $\beta$  e  $\lambda$  parâmetros e  $u$  é um vetor de erros independentes identicamente distribuídos:

$$Y = X\beta + \varepsilon, \varepsilon = \lambda W + u \quad [5]$$

Em ambos os modelos, é necessária a utilização de uma matriz de pesos ( $W$ ), de modo a que este tenha em conta a autocorrelação das variáveis.

Os pesos são fundamentais na análise de dependência espacial. Esta matriz permite expressar a vizinhança das observações, dando uma componente espacial às variáveis. A matriz de pesos pode ser calculada por distância ou por contiguidade, sendo que neste último podem ser do tipo *Rook* ou *Queen*. No primeiro tipo assume-se como vizinhança unidades espaciais que partilhem uma fronteira, enquanto que no segundo, para além da fronteira, são consideradas as unidades que também tenham um vértice em comum.

Os métodos estatísticos são fundamentais para este trabalho uma vez que permitem aferir a validade e precisão dos modelos e dos resultados. Um dos testes mais importantes é o coeficiente de determinação ( $r^2$ ), que permite verificar o ajuste da regressão às observações; a Multicolinearidade, que permite avaliar se existe forte correlação entre a variável dependente e uma ou mais variáveis independentes (o que se verifica se o valor for elevado); e o Akaike Info Criterion (AICc), que mede o ajuste do modelo estatístico (melhor ajuste para valores menores de AICc). (GeoDa<sup>a</sup>) (GeoDa<sup>b</sup>) (Anselin, 2003)

Para além de validar os resultados e o modelo, o recurso a estes testes estatísticos apoia a escolha do modelo de regressão mais indicado para o conjunto de dados.

Aliando toda a experiência proveniente da bibliografia mencionada aos métodos SIG e de análise espacial, pretende-se, com este trabalho, estudar como é que a radiação solar depende espacialmente de um conjunto de descritores de forma urbana, possibilitando assim a criação de um modelo que permita estimar o potencial solar nos telhados dos edifícios. Será analisada, através de modelos de regressão linear, a relação entre a radiação solar e a morfologia da cidade de Lisboa, sendo por isso necessária a criação um modelo solar. Com todas estas informações, será possível ainda estimar, e mapear, o potencial solar na área em estudo da cidade de Lisboa.

## Capítulo 3 – Descrição da área de estudo e da metodologia do trabalho

### 3.1 Escolha da área de estudo

A área de estudo escolhida compreende três freguesias do concelho de Lisboa: Avenidas Novas, Areeiro e Alvalade. Em conjunto estas freguesias perfazem uma área de 10,07 km<sup>2</sup> (CML, 2016) e servem de residência a 73568 habitantes (INE, Censos 2011), representando cerca de 10% e 13% da área e população do concelho de Lisboa, respetivamente. As freguesias não apresentam variações acentuadas de relevo.

As freguesias de Areeiro e Alvalade são de cariz maioritariamente residencial, sendo a primeira caracterizada por maior construção em altura (53% dos edifícios têm 5 ou mais pisos) e a segunda por uma maior percentagem de edifícios com menos 4 pisos (69%). A freguesia das Avenidas Novas caracteriza-se por uma elevada percentagem de edificado em altura (62% com 5 ou mais pisos) e pelo equilíbrio entre as funções residenciais e de serviços. (CML, 2016)

Os critérios de escolha desta área de estudo prendem-se com a disponibilidade de dados LiDAR para aquela área e pela heterogeneidade do seu edificado, que pretende representar a diversidade existente na cidade de Lisboa. Isto é importante para encontrar um modelo que se adequa a diferentes tipos de morfologia urbana.

Nestas freguesias está presente uma grande heterogeneidade do edificado onde existem:

- Áreas com maior e menor distribuição vertical;
- Áreas com maior cobertura por edifícios ou zonas verdes;
- Áreas onde predominam blocos de apartamentos ou moradias unifamiliares.

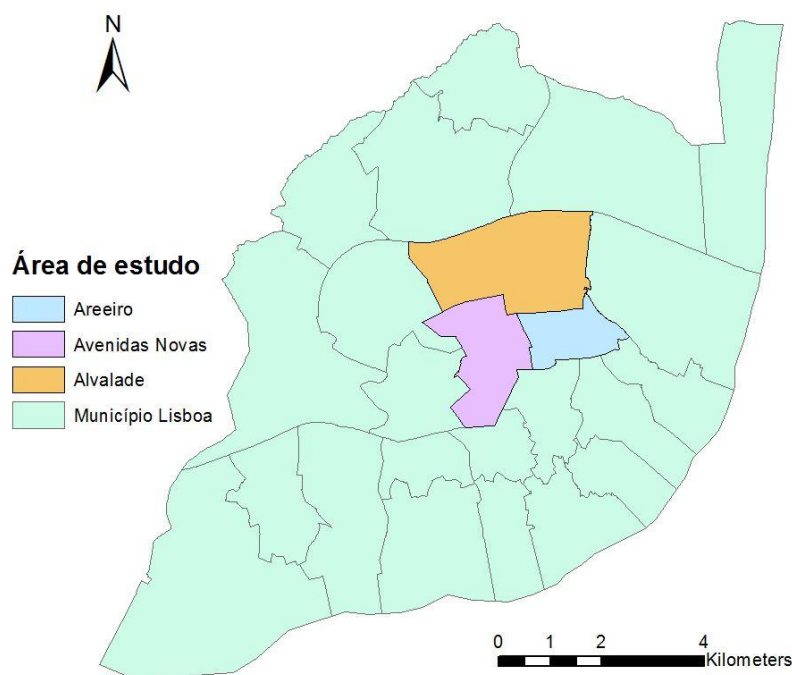


Figura 15 – Localização da área de estudo (freguesias realçadas) dentro do município de Lisboa

### 3.2 Descrição dos dados usados

A realização deste trabalho, em especial da criação do modelo solar e da determinação, foi possível com recurso a diversa informação cartográfica base georreferenciada, tanto em formato *raster* como em formato vetorial, descrita na Tabela 2. Esta informação foi depois processada espacialmente em ambiente *ArcMap* do *ArcGIS* (ESRI, 2016), utilizando o sistema de coordenadas adotado em Portugal Continental, PT-TM06/ETRS89 (DGT, 2006).

Tabela 2 - Características dos dados utilizados

Nome	Fonte	Data	Escala	Projeção
<b>Carta Administrativa Oficial de Portugal (CAOP)</b>	DGT	2014	1:25000	PT-TM06/ETRS89
<b>Carta das subsecções estatísticas (BGRI) dos Censos 2011 da região da Grande Lisboa</b>	INE	2011	n.a.	
<b>Carta do edificado das freguesias escolhidas (Digitalização da cartografia)</b>	CIGeoE	n.a.	1:25000	
<b>Dados LiDAR</b>	LOGICA	2006	n.a.	
<b>Modelo Digital de Terreno (MDT)</b>	CIGeoE	2006	1:25000	
<b>Carta de Ocupação do Solo</b>	DGT	2010	0,5 m	

Através da CAOP de 2014 (DGT, 2014), foi possível obter a delimitação das três freguesias que compõem a área de estudo, sob a forma de polígonos.

Neste trabalho a análise/mapeamento dos parâmetros e radiação irá ocorrer ao nível das subsecções censitárias, BGRI (Base Geográfica de Referenciação de Informação), a menor divisão estatística possível. Para isto, obteve-se, no sítio do Instituto Nacional de Estatística, cartografia vetorial em formato *shapefile* das subsecções estatísticas que compõe as 3 freguesias em estudo. Agrupado à *shapefile* vem ainda informação complementar, na forma tabular, relativo ao último levantamento censitário realizado em 2011. Cada BGRI está identificada com um código único nas tabelas que acompanham a cartografia (BGRI11). (Geirinhas, 2001) (INE, 2011)

Também a informação georreferenciada sobre o edificado da cidade de Lisboa é apresentada sob a forma de polígonos. Nesta camada de informação, podem obter-se informações sobre as características geométricas dos edifícios, sendo que não há qualquer diferenciação entre os vários tipos de edifício (residencial, serviços e outros tipos de infraestruturas). No entanto, após análise dos valores de altura presentes na informação tabular associada à carta do edificado da área de estudo, conclui-se que existiam algumas irregularidades, sendo necessário recalcular as alturas de todos os edifícios, tal como descrito na secção 3.3.2 Distribuição vertical do edificado.

Os dados LiDAR são apresentados sob a forma de pontos e com uma resolução espacial de 1 metro.

O MDT e a Carta de Ocupação do Solo, ao contrário dos anteriores, apresentam um formato matricial ou *raster*, tendo por isso associada uma escala de cores. No MDT, apresenta-se a variação do relevo da área de estudo e a Carta de Ocupação do Solo permite obter, a partir do valor dos *pixels*, a

ocupação do terreno, como por exemplo, zonas residenciais, zonas verdes ou zonas pavimentadas (rede viária, estacionamento, vias férreas, entre outros usos).

### 3.3 Caracterização espacial do meio urbano

Esta fase consistiu na escolha dos parâmetros a considerar neste estudo. Na fase inicial consideraram-se os parâmetros descritos na Tabela 2 de Sarralde *et al.* (2015).

Em virtude dos dados disponíveis e do tipo de edificado presente na cidade de Lisboa, decidiu-se analisar os parâmetros constantes na Tabela 3. Além disso, pretendia-se replicar o estudo realizado em Londres por Sarralde *et al.*, (2015) para uma cidade onde a heterogeneidade do seu edificado fosse mais evidente, procurando-se então encontrar um modelo para estimar o potencial solar em qualquer cidade, explicado apenas pela sua morfologia. Partiu-se por isso da lista de parâmetros apresentada naquele estudo, adaptando-os à realidade de Lisboa e aos dados disponíveis.

Através destes parâmetros tentou que os parâmetros escolhidos refletissem da melhor forma possível a morfologia urbana da cidade de Lisboa.

Tabela 3 - Descritores da morfologia urbana considerados no trabalho

Grupo	Parâmetro	Unidades
Tipologia do Edificado	1. Proporção de moradias isoladas	%
	2. Proporção de moradias geminadas	%
	3. Proporção de blocos de apartamentos	%
Distribuição Vertical do Edificado	4. Altura média	m
	5. Desvio padrão das alturas médias	m
Uso do Solo	6. Proporção de área coberta por edifícios ( <i>plot ratio</i> )	%
	7. Proporção de área coberta por estradas	%
	8. Proporção de áreas verdes	%
	9. Proporção de área coberta por estacionamento	%
	10. Proporção de área coberta por outro tipo de pavimentos	%
	11. Área total edificada	m <sup>2</sup>
	12. Área total da BGRI	m <sup>2</sup>
Geometria do Edificado	13. Volume médio	m <sup>3</sup>
	14. Perímetro médio	m
	15. Orientação média (Variação entre a fachada principal e o Norte verdadeiro)	°

Neste trabalho a análise/mapeamento dos parâmetros e radiação irá ocorrer ao nível das subsecções censitárias, uma vez que esta é a mais pequena divisão administrativa disponível. Sendo um dos

objetivos, a identificação de áreas onde o potencial solar dos edifícios é relevante, é necessário analisar áreas com um número limitado de edifícios.

Como cada BGRI apresenta informações sobre um conjunto menor de edifícios (ex. número de habitantes daquela área) e, apresenta áreas menores comparativamente com o nível acima de divisão administrativa (a freguesia, que tem maior área e maior número de edifícios), a realização do estudo ao nível das subsecções estatísticas permite um maior grau de detalhe na análise e uma localização mais definida de áreas com bom potencial solar.

Além disso, relacionando as áreas ocupadas pelas BGRI com alguns dos parâmetros (ex.: área ocupada por zonas verdes), é possível fazer uma relação entre os edifícios e os parâmetros de envolvente, que de outra forma não poderiam ser relacionados com os edifícios.

Antes da determinação dos diferentes parâmetros foi realizado um pré-tratamento da cartografia do edificado, uma vez que foi necessário retirar edifícios que não estavam no âmbito do estudo, como campos de jogos, polidesportivos, estacionamento incorretamente identificados como edifícios e edifícios com altura inferior a 3 metros.

Nos mapas em que se mostra a distribuição dos descritores de forma urbana pelas BGRI os valores apresentados são sempre normalizados (exceto quando representam uma proporção) de modo a permitir uma mais fácil identificação das áreas/parâmetros cruciais, assim como permitem uma melhor comparação entre os diferentes descritores. A normalização foi feita da seguinte forma:

$$X' = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad [6]$$

A criação destes mapas temáticos, um para cada parâmetro, permite, primeiramente, fazer uma análise visual da importância dos parâmetros estudados e permite ainda compreender a sua distribuição espacial a qual dará a ideia das associações espaciais existentes ou eventualmente zonas com valores de atributo anómalos.



### 3.3.1 Tipologia do edificado

Um dos parâmetros que determina a morfologia de uma cidade é o tipo de edificado que nela existe. Neste trabalho estudaram-se 3 tipos de edifícios:

- Edifícios de apartamentos;
- Moradias geminadas (uma ou mais moradias ligadas entre si);
- Moradias isoladas.

Considerando que um edifício de apartamentos tem 3 ou mais pisos e que cada piso tem uma altura média de 3 metros, classificaram-se como edifícios de apartamentos todos os edifícios com mais de 11 metros, fazendo uma seleção por atributos (neste caso a altura). Os restantes edifícios foram considerados moradias.

A seleção entre moradia geminada e isolada foi realizada com recurso a uma *query* SQL (*Select by Attributes*) no *Microsoft Access*, em que se o código que identifica um segmento de um edifício fosse diferente do código único que identifica esse edifício (OBJECTID), então esse edifício teria um edifício ao lado, sendo assim classificado como moradia geminada. Esta parte do trabalho foi possível uma vez que já existia informação cartográfica sobre os segmentos que delimitam os polígonos (ver secção 3.3.4 Geometria do edificado). As moradias isoladas foram determinadas excluindo na cartografia original do edificado os edifícios já identificados como edifícios de apartamentos ou moradias geminadas. A metodologia simplificada para a determinação destes parâmetros encontra-se descrita no fluxograma apresentado na Figura 16.

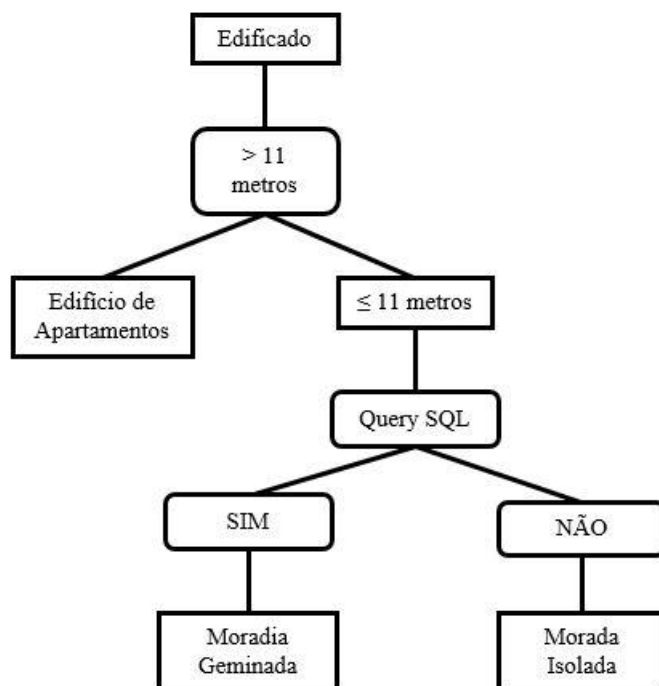


Figura 16 - Fluxograma da metodologia para determinação da tipologia do edificado

Após a determinação da tipologia do edificado, recorrendo a um *Summary Statistics*, ferramenta do ArcMap que permite calcular diversos tipos de estatísticas recorrendo às informações tabulares de uma camada de informação geográfica, determinou-se o número de edifícios em cada uma das categorias. Dividindo esses valores pelo número total de edifícios existentes em cada BGRI, foram determinadas as proporções de apartamentos e de moradias isoladas e geminadas.

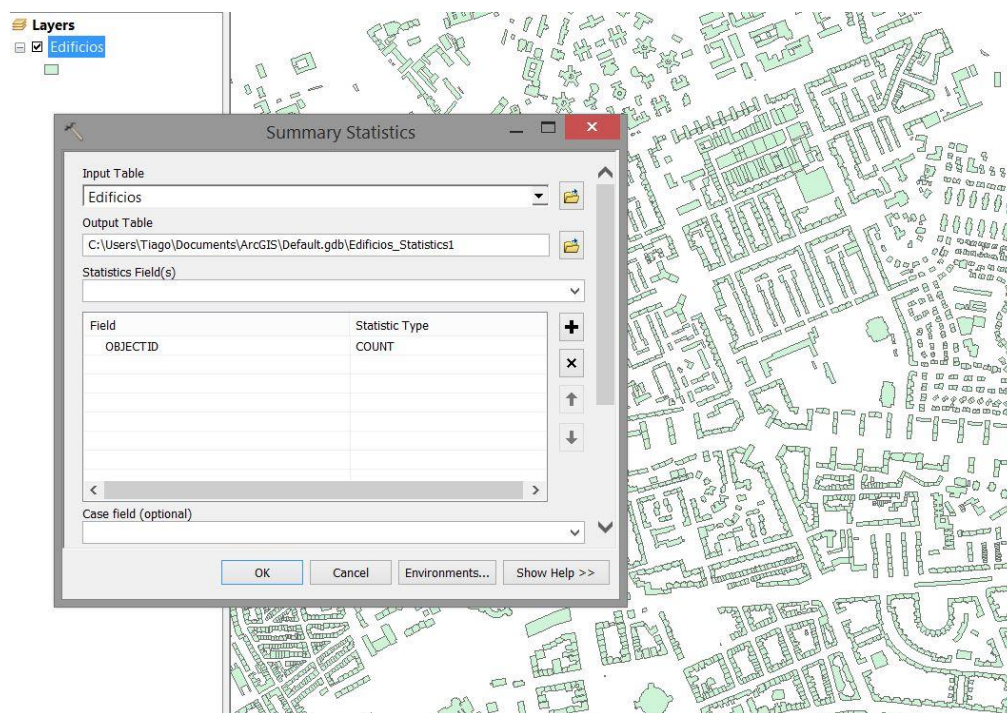


Figura 17 - Interface do *Summary Statistics* do ArcMap

Na figura acima, é possível verificar o modo de contagem dos edifícios existentes na área de estudo, adicionando a camada de informação do edificado e utilizando a estatística COUNT para os OBJECTID dos edifícios, isto é o seu código único. Esta ferramenta foi depois utilizada, da mesma forma, para cada uma das tipologias de edificado.

Nos mapas abaixo é possível observar a proporção de apartamentos (Figura 18), moradias geminadas (Figura 19) e moradias isoladas (Figura 20), por subsecção estatística. É possível verificar ainda que há uma predominância de edifícios de apartamentos, em especial na área central da área de estudo (zona das Avenidas Novas). É possível verificar ainda que as moradias isoladas têm mais incidência na periferia da área de estudo e que as moradias geminadas surgem normalmente em *cluster*, em especial, na freguesia de Alvalade.

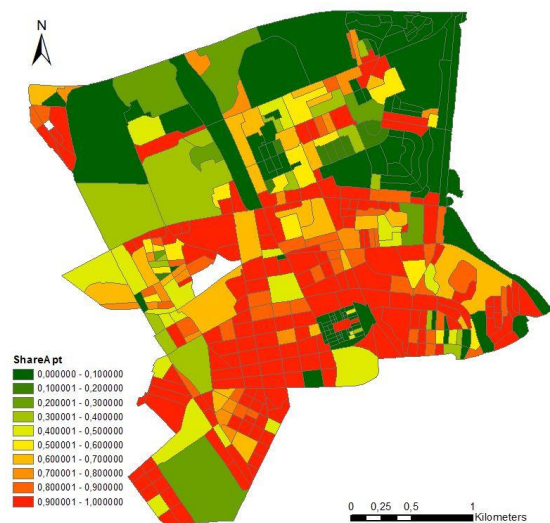


Figura 18 - Proporção de apartamentos por BGRI

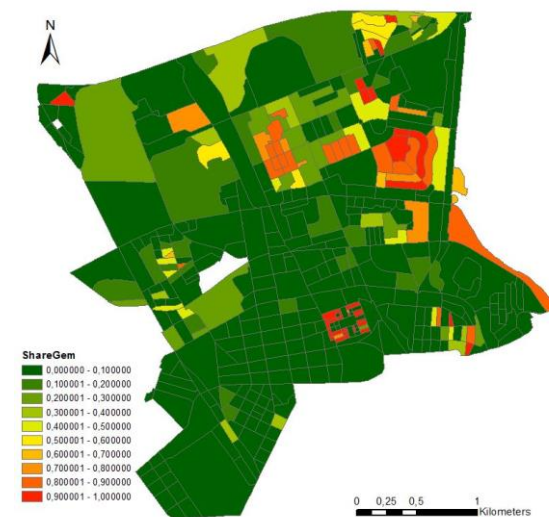


Figura 19 - Proporção de moradias geminadas por BGRI

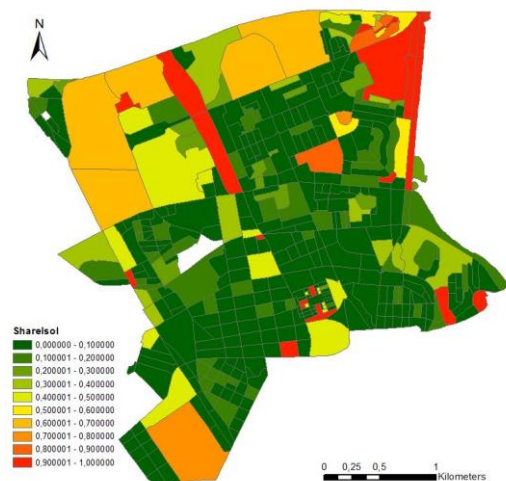


Figura 20 - Proporção de moradias isoladas por BGRI

### 3.3.2 Distribuição vertical do edificado

Uma das características mais marcantes de uma cidade é a sua linha do horizonte, a variação na altura do seu edificado. Esta é a razão pela qual a altura dos edifícios é um dos melhores e principais descritores de morfologia urbana. Torna-se assim um fator essencial de ser analisado.

A altura dos edifícios foi calculada utilizando os dados LiDAR disponíveis para a área de estudo. Os dados LiDAR apresentam a informação altimétrica relativa ao nível médio do mar, e apresentam uma resolução espacial muito melhor (1 metro) que um MDT disponível. Para obter a altura dos edifícios, seria necessário remover a altura dos pontos LiDAR a altitude do terreno. Como as resoluções espaciais eram tão díspares, teve de ser encontrada outra estratégia para obter a altura dos edifícios. Trabalhou-se então exclusivamente com os dados LiDAR, que “varrem” os edifícios mas também o solo, possibilitando assim trabalhar com resoluções espaciais de dados iguais. Para isto criou-se um *buffer*, isto é, uma área circundante aos edifícios, de 2 metros de modo a obter um valor médio que representasse o nível do solo. Assumiu-se que a distância de 2 metros já proporcionaria uma boa aproximação do nível do solo. Depois, ao calcular-se o valor médio no topo dos edifícios, o nível do solo era-lhe subtraído, obtendo assim a altura correta do edifício. Este processo encontra-se descrito nas figuras abaixo.

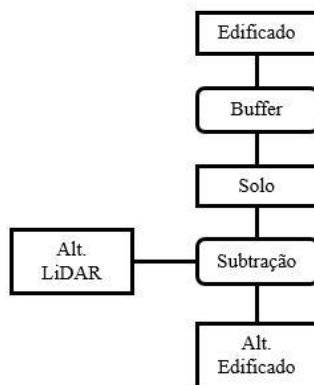


Figura 21 - Fluxograma do procedimento de criação do *buffer* e de atribuição da altura dos edifícios

É importante referir que este passo só foi necessário uma vez que os dados LiDAR utilizados não estavam classificados, ou seja, a cada ponto LiDAR não estava atribuída informação sobre o tipo de objeto presente. Entre as classificações possíveis para cada ponto, estão, por exemplo, vegetação, edifício, água, entre outros (ESRI, 2018).

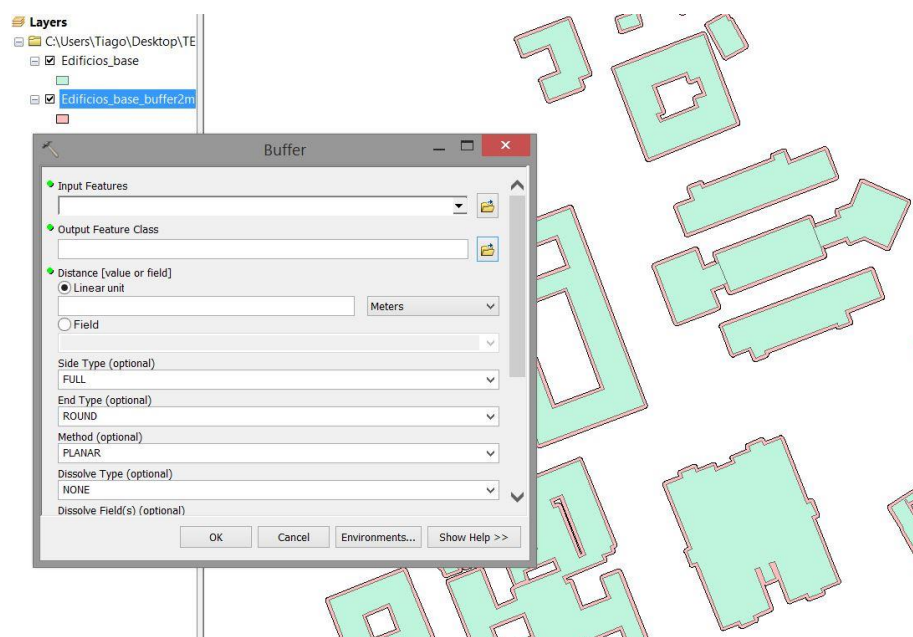


Figura 22 - Interface da ferramenta *buffer* do ArcMap e exemplo de utilização na área de estudo (a verde os edifícios e a rosa o *buffer* de 2 metros)

Nesta figura é possível ver a interface da ferramenta *buffer* do ArcMap. Para utilizar esta ferramenta é necessário adicionar uma camada de informação, em formato vetorial, e a distância para o qual se quer criar a área circundante.

Ao chegar a esta fase verificou-se que a altura de alguns edifícios não estava correta. Este erro pode dever-se ao facto da cartografia do edificado não ter a mesma data do levantamento de dados LiDAR. Isto poderia levar a erros quando os edifícios:

- Não existiam;
- Estavam em construção;
- Estavam devolutos (só existia a fachada).

Além disso, os dados LiDAR não estavam disponíveis para toda a área de estudo, havendo uma falta de dados no extremo Noroeste da mesma. Para verificar e corrigir estes erros recorreram-se às imagens mais recentes do *Google Maps* e *Google Street View* da *Google*. Através das imagens do *Street View* foi possível fazer uma aproximação das alturas dos edifícios em falta ou com erros, tendo em conta o número de pisos e considerando a aproximação dos 3 metros de altura por piso. Para testar se esta aproximação era válida, esta metodologia foi testada em edifícios cuja altura foi obtida através dos dados LiDAR. Como os resultados de ambas as metodologias são semelhantes, concluiu-se que esta aproximação é válida.

Nesta fase foram, ainda, removidos todos os *outliers*, ou seja, todos os edifícios com altura menor que 3 metros, pois tal como descrito anteriormente, foi utilizada a aproximação deste valor de altura por piso, significando que se o valor for abaixo, não estaríamos perante um edifício, podendo ser apenas um erro ou uma estrutura mais pequena que não tenha as condições necessárias para estar abrangida neste trabalho.





Figura 23 - Exemplo de imagem utilizada para o cálculo aproximado da altura dos edifícios (Imagem: Google Street View, Google, 2017)

Recorrendo aos dados da tabela que complementa a informação em formato vetorial do edificado, foi possível, no *ArcMap*, calcular a altura média e o desvio padrão da altura média para cada BGRI, tal como se apresenta nos mapas temáticos das Figura 24 e Figura 25.

O desvio padrão mede a variação em relação ao valor médio de um conjunto de dados e é dada pela seguinte expressão:

$$\sigma = \sqrt{E(X^2) - \mu^2} \quad [7]$$

Neste caso específico, o desvio padrão da altura média permite perceber qual a dispersão dos valores de altura em relação ao valor de altura média. Alto desvio padrão, sugere uma elevada dispersão dos valores de altura dos edifícios dentro de uma BGRI em relação à altura média presente dentro dessa mesma BGRI. Baixos valores de desvio padrão indicam que as alturas dos edifícios se encontram perto do valor médio.

Altos valores de desvio padrão representam alguma heterogeneidade de edificado (pelo menos a nível de altura). Baixos valores de desvio padrão indicam homogeneidade do edificado, significando que existem mais edifícios dentro de uma BGRI com alturas semelhantes.

No mapa da Figura 24, é possível verificar que existe uma maior concentração de construção em altura na zona central da área de estudo, em concordância com a avaliação feita anteriormente, e visível na Figura 18. Segundo a Figura 25, é possível ter uma ideia da heterogeneidade do edificado (apenas ao nível da altura) existente no interior das subsecções estatísticas.

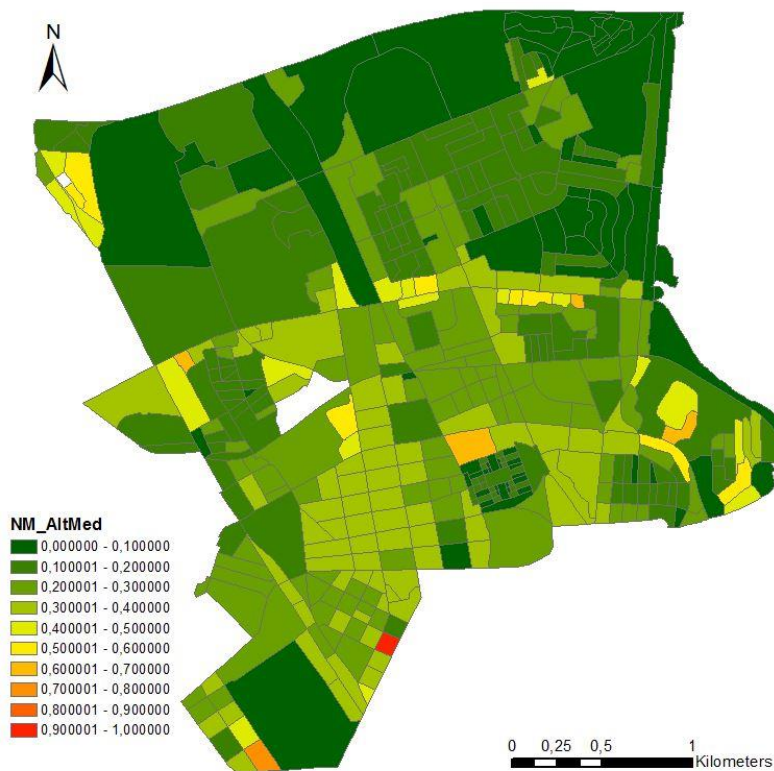


Figura 24 - Valores normalizados de altura média dos edifícios por BGRI

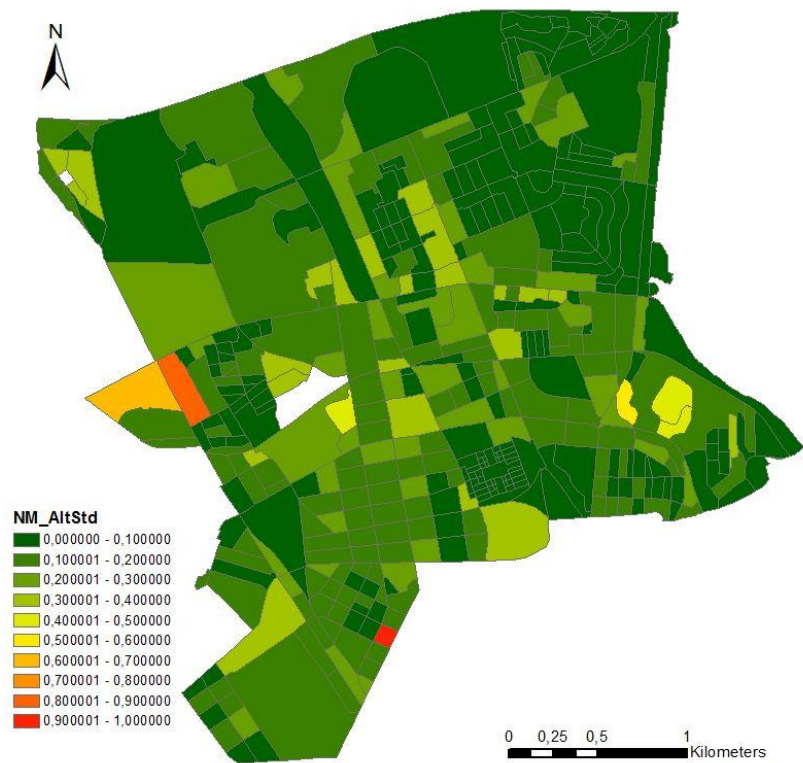


Figura 25 - Valores normalizados de desvio padrão da altura média dos edifícios por BGRI

### 3.3.3 Uso do solo

Nesta categoria pretendeu-se caracterizar a ocupação do solo na cidade de Lisboa. A primeira fase consistiu na determinação das áreas das BGRI abrangidas pela zona de estudo e também o total da área edificada em cada uma recorrendo à ferramenta “*Calculate Geometry*”, do *ArcMap*, nas cartografias em formato *shapefile* das subsecções estatísticas e do edificado.

Esta ferramenta permite calcular a área das BGRI automaticamente através do programa.

Em seguida pretendeu-se caracterizar efetivamente a ocupação do solo, começando pelos edifícios. Para isto determinou-se o parâmetro *Plot Ratio* da seguinte forma:

$$Plot\ Ratio = \frac{\text{Área total edificada}}{\text{Área da BGRI}} \quad [8]$$

Este parâmetro dá-nos uma indicação de qual a proporção de área da BGRI está coberta por edifícios.

No entanto, a morfologia de uma cidade não é apenas composta por edifícios. Existem outros tipos de infraestruturas que têm igualmente de ser estudadas. São elas:

- Rede viária;
- Áreas verdes (foram consideradas áreas verdes e cemitérios);
- Estacionamento;
- Outros tipos de pavimentos (foram consideradas outros tipos de pavimentos como ferrovias, passeios, etc).

Para a determinação destes parâmetros recorreu-se à carta de ocupação do solo com uma resolução espacial de 0,5 m (DGT) para a área de estudo. Utilizando a ferramenta “*Select by attributes*” do *ArcMap*, selecionaram-se as áreas com os códigos respeitantes a cada tipo de infraestrutura e depois calcularam-se as áreas totais de cada uma delas, através do *Summary Statistics*.

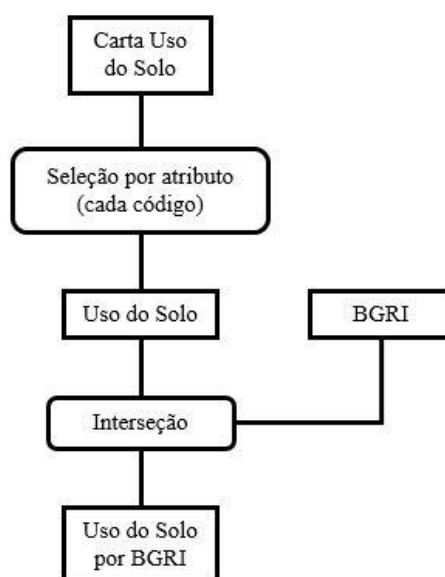


Figura 26 - Fluxograma do procedimento para determinação do uso do solo por BGRI

Nas figuras seguintes é possível ver o resultado desta análise, observando-se a distribuição das áreas mais edificadas, zonas verdes, entre outras, ao longo da área de estudo.



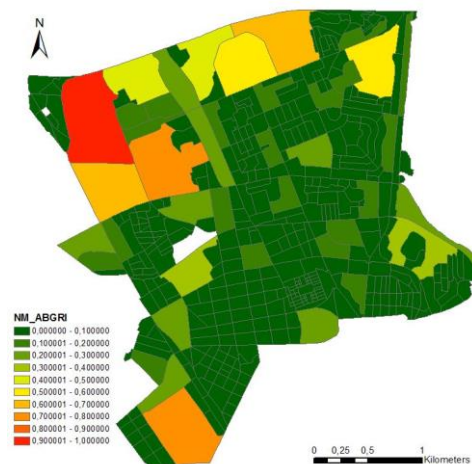


Figura 27 - Valores normalizados da área de cada BGRI



Figura 28 - Valores normalizados de área edificada total em cada BGRI

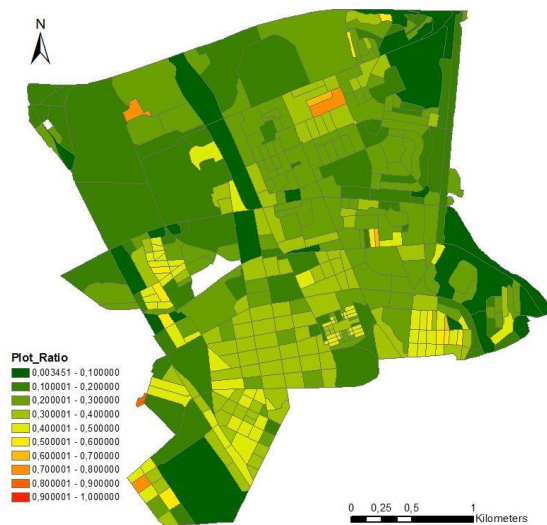


Figura 29 - Proporção de área coberta por edifícios em cada BGRI

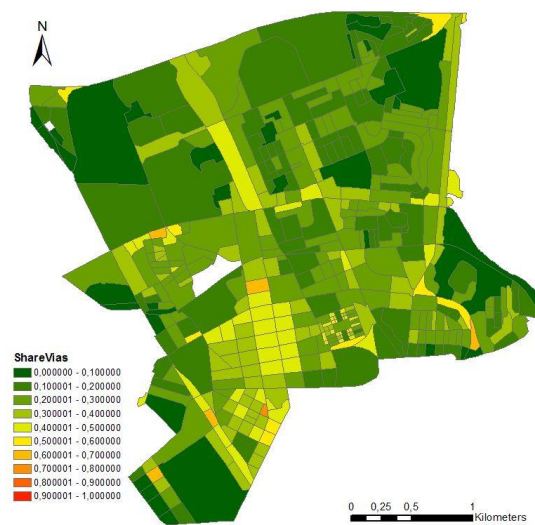


Figura 30 - Proporção de área coberta por rede viária em cada BGRI

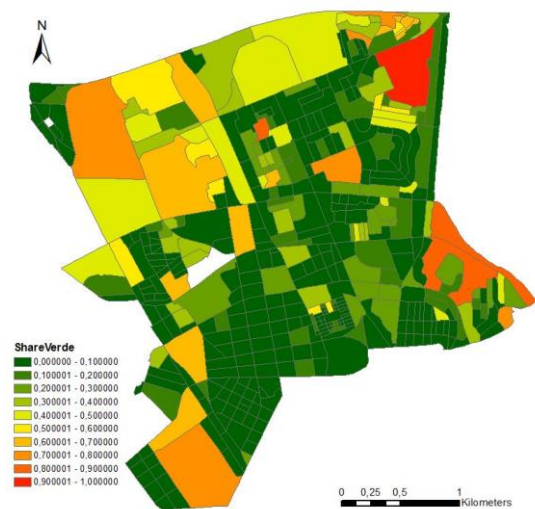


Figura 31 - Proporção de áreas verdes por BGRI

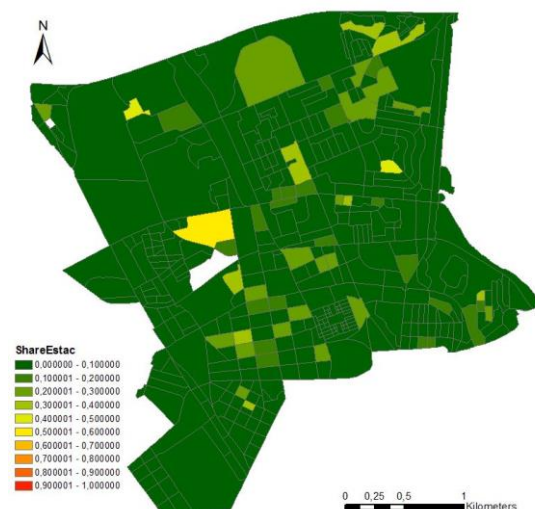


Figura 32 - Proporção de área coberta por estacionamentos em cada BGRI

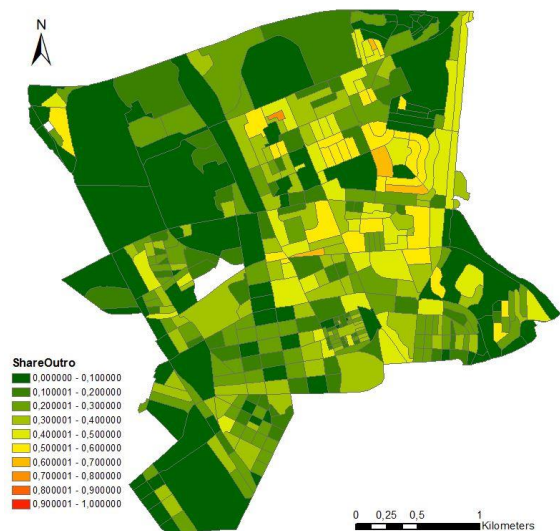


Figura 33 - Proporção de área coberta por outros tipos de pavimentos em cada BGRI

### 3.3.4 Geometria do edificado

Nesta categoria determinaram-se o volume, perímetro e orientação média dos edifícios. O primeiro parâmetro foi calculado diretamente na tabela de atributos da camada de informação dos edifícios, recorrendo à expressão:

$$Volume = Área \times Altura \quad [9]$$

O perímetro foi calculado com recurso à ferramenta de cálculo de geometria do ArcMap (*Calculate Geometry*), como se mostra na Figura 34.

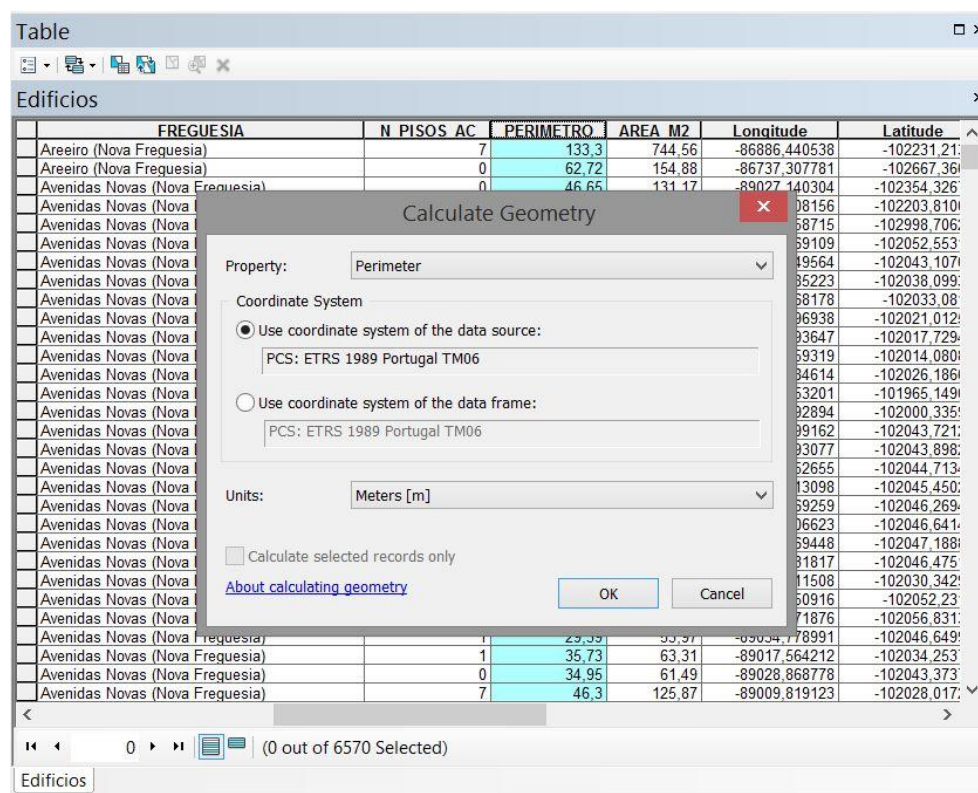


Figura 34 - Interface da ferramenta *Calculate Geometry* do ArcMap

Outro dos parâmetros que é fundamental estudar é a orientação dos edifícios. Como se sabe, no Hemisfério Norte, de forma a maximizar a produção dos painéis solares, estes devem estar orientados a Sul. Numa cidade em que grande parte dos seus edifícios estejam orientados a Sul, é possível maximizar a radiação que estes recebem. Este parâmetro é extremamente importante num futuro estudo das fachadas dos edifícios. Pretende-se então estudar a orientação média dos edifícios em cada subsecção estatística.

A orientação média do edifício entende-se como a variação angular entre a fachada principal dos edifícios e o Norte verdadeiro. Para se determinar este descritor, foi necessário converter os polígonos que compõem a cartografia do edificado em linhas e encontrar a orientação de cada uma delas, utilizando as ferramentas *Split Line at Vertices* e *Add Geometry: Line Bearing* (Figura 35) do ArcMap, respetivamente. A primeira ferramenta permite dividir um polígono em várias linhas, dividindo-o nos seus vértices; já a segunda permite calcular automaticamente a orientação de um segmento de reta. Neste caso foi necessário fazer uma correção, uma vez que o cálculo resultava na direção do segmento de reta. No entanto, pretendia-se a orientação da fachada, ou seja, a orientação perpendicular ao segmento de reta. Foi feita, então, na informação tabular de cada segmento, uma correção de 90°.

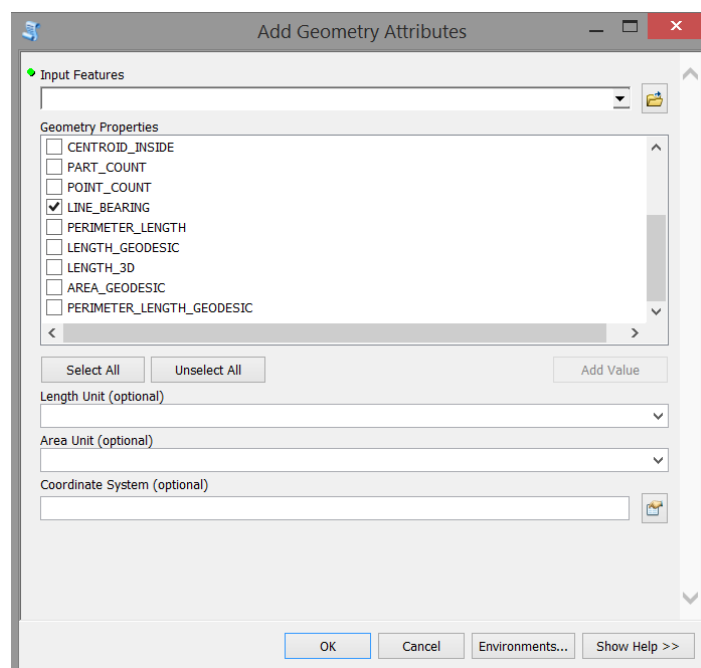


Figura 35 - Interface da ferramenta *Add Geometry: Line Bearing* do ArcMap

Considerando que a linha de maior comprimento representa a fachada principal do edifício, recorreu-se, então, a uma *query* SQL em ambiente *Microsoft Access* para encontrar qual a orientação de cada edifício. Esta metodologia encontra-se descrita no fluxograma da Figura 36.

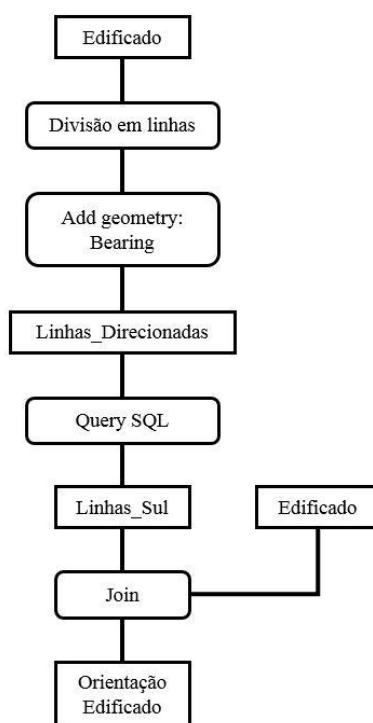


Figura 36 - Fluxograma com o procedimento para a determinação orientação de cada edifício

Após os cálculos, foram feitas as médias dos 3 descritores de forma urbana para cada BGRI, tal como apresentados nos mapas que se segue.

No caso do mapa temático da orientação média dos edifícios por subsecção estatística (Figura 39) é importante referir a amplitude dos dados:

- Entre 0 e 0,25, os edifícios estão orientados entre  $0^{\circ}$  e  $90^{\circ}$ , ou seja, entre Norte e Este;
- Entre 0,25 e 0,50, os edifícios estão orientados entre  $90^{\circ}$  e  $180^{\circ}$ , ou seja, entre Este e Sul;
- Entre 0,50 e 0,75, os edifícios estão orientados entre  $180^{\circ}$  e  $270^{\circ}$ , ou seja, entre Sul e Oeste;
- Entre 0,75 e 1, os edifícios estão orientados entre  $270^{\circ}$  e  $360^{\circ}$ , ou seja, entre Oeste e Norte.



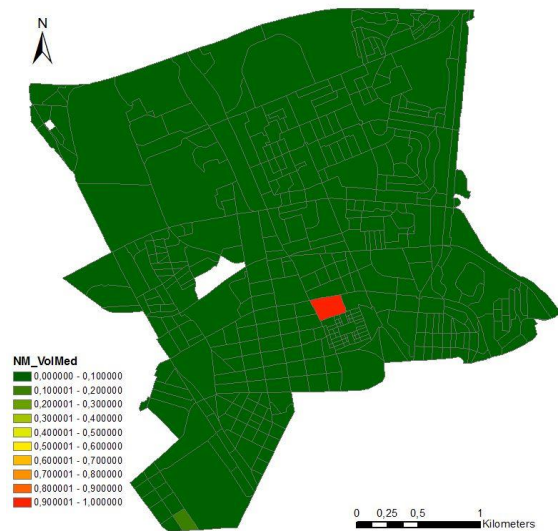


Figura 37 - Valores normalizados do volume médio dos edifícios para cada BGRI

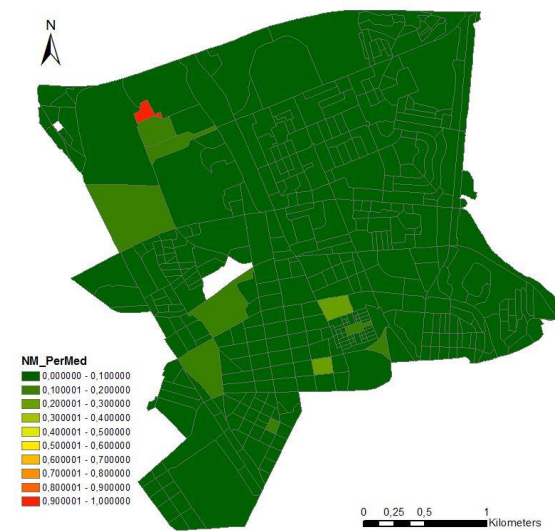


Figura 38 - Valores normalizados do perímetro médio dos edifícios para cada BGRI

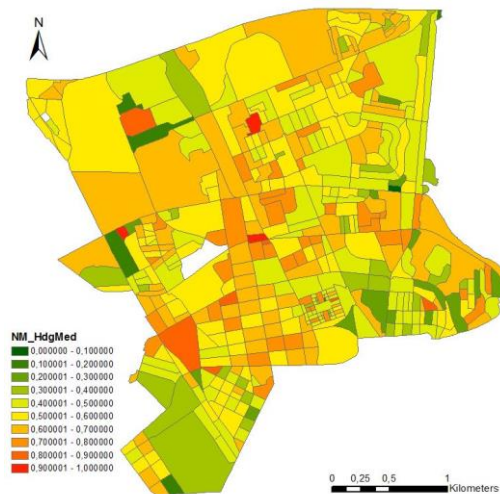


Figura 39 - Valores normalizados da orientação média dos edifícios para cada BGRI

### 3.4 Modelo Solar

Para se chegar a uma relação entre a radiação e os diferentes descritores de morfologia urbana, foi necessária a construção de um modelo solar para a área em estudo.

O modelo solar foi construído com recurso ao *Solar Analyst (Area Solar Radiation)* do *ArcMap 10.4* (Fu e Rich, 2000) (Esri, 2016). De modo a obter um cálculo mais rigoroso da radiação, tendo em conta não só a orografia do terreno, mas também os edifícios, foi criado um Modelo Digital de Superfície (MDS). Este consiste na junção dos dados cartográficos em formato *raster* do Modelo Digital de Terreno (MDT) com os dados cartográficos do edificado em formato *shapefile*.

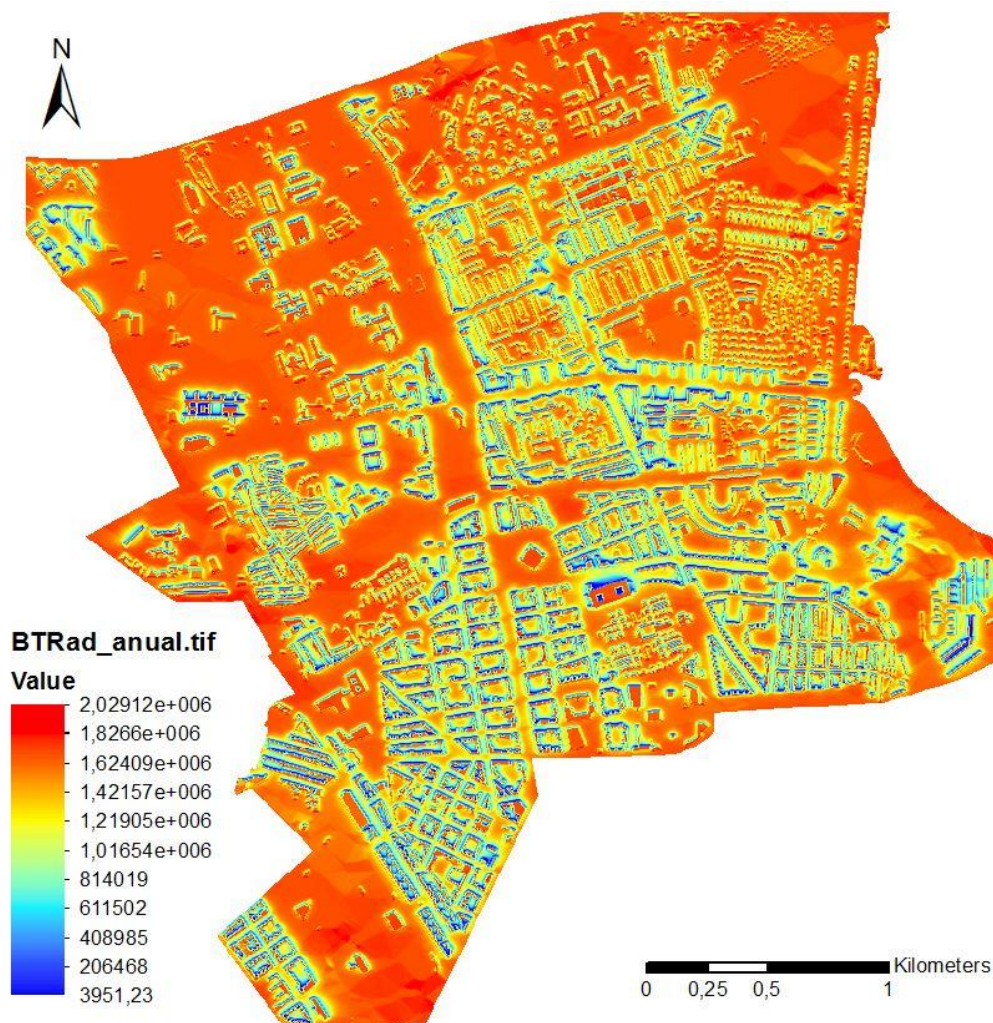


Figura 40 – Distribuição da radiação solar na área de estudo (incluindo telhados e terreno) (Valores de radiação anual expressos em Wh/m<sup>2</sup>)

Na Figura 40 é possível ver a distribuição da radiação pela área de estudo, modelada pela ferramenta *Solar Analyst* do *ArcMap*. Os valores de radiação anual variam entre os 3,95 kWh/m<sup>2</sup>/ano nas áreas menos expostas (especialmente no solo, à sombra dos edifícios) e os 2,03 MWh/m<sup>2</sup>/ano nas áreas mais expostas. Observando a imagem, e focando nas áreas de sombra, é possível inferir que estas têm grande influência na radiação que chega às fachadas, razão pelo qual é necessário dar ênfase ao estudo das sombras que os edifícios provocam entre si no caso de se incluir o estudo do potencial solar das fachadas.

O algoritmo *Solar Analyst* considera constantes ao longo do ano os coeficientes de difusão e de transmissividade, não refletindo, no entanto, a realidade. É por isso necessária uma calibração do modelo solar de modo a obter resultados mais precisos (apenas para a horizontal), tal como descrito em Gomes (2011). A calibração foi feita no centróide da união das freguesias (38° 44' 45,6" N 9° 8' 45,4668" W), uma vez que para a área de estudo, as variações na radiação são pequenas e negligenciáveis (a área de estudo não é extensa o suficiente para serem consideradas).

Foi calculada a radiação mensal no centróide da união das 3 freguesias por dois métodos: pelo PVGIS (Suri *et al.*, 2005) e pelo *Solar Analyst (Point Solar Radiation)* do *ArcMap* (Fu e Rich, 2000). Tomando o valor do PVGIS como referência, fez-se variar, mensalmente, o valor dos coeficientes de difusão e de transmissividade até que o valor mensal fosse próximo da referência. Recorreu-se depois ao *Solar Analyst (Area Solar Radiation)* para calcular o valor mensal da radiação para toda a área de estudo, utilizando o conjunto de valores de coeficiente de radiação difusa e de transmissividade obtido para cada mês. Em seguida mostram-se os resultados da calibração.

Tabela 4 - Valores mensais do coeficiente de radiação difusa e de transmissividade utilizados na calibração do modelo solar

Mês	Difusão	Transmissividade
<i>Default</i>	<i>0,3</i>	<i>0,5</i>
<b>Janeiro</b>	0,5	0,6
<b>Fevereiro</b>	0,4	0,6
<b>Março</b>	0,4	0,6
<b>Abril</b>	0,3	0,6
<b>Mai</b>	0,3	0,6
<b>Junho</b>	0,2	0,7
<b>Julho</b>	0,2	0,7
<b>Agosto</b>	0,2	0,7
<b>Setembro</b>	0,3	0,7
<b>Outubro</b>	0,5	0,6
<b>Novembro</b>	0,5	0,6
<b>Dezembro</b>	0,5	0,6



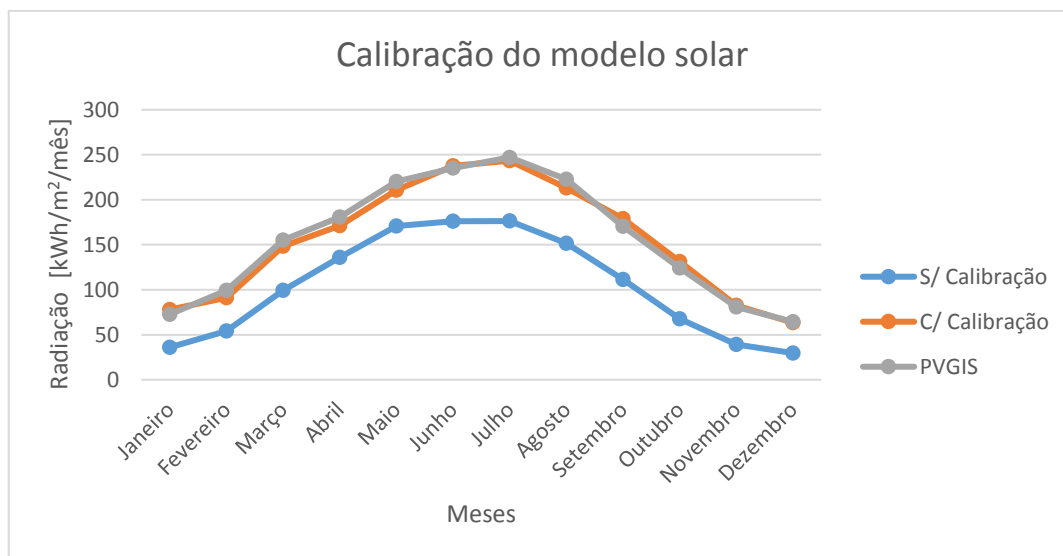


Figura 41 - Calibração do modelo solar

Com esta calibração conseguiu reduzir-se a variação da radiação anual, em relação ao PVGIS, de 33% para 1,25%. Ao mesmo tempo, foi possível reduzir o erro médio dos valores de radiação mensal de 33% para 4%. Estes resultados são consistentes com o estudo de Gomes (2011).

Como nesta dissertação só foi contabilizada a radiação nos telhados dos edifícios, o modelo solar (Figura 40), foram retirados os valores de radiação que fizessem parte do terreno.

Ao associar-se a informação em formato vetorial do edificado (*shapefile*) ao modelo solar (após conversão do formato matricial em formato vetorial) foi possível efetuar uma seleção utilizando a ferramenta *clip* do ArcMap, de onde foi possível retirar os valores de radiação nos telhados dos edifícios. Constatou-se que existiam diferentes valores de radiação para os telhados, sendo por isso necessário encontrar um valor médio. Para isso utilizou-se a ferramenta *dissolve* do ArcMap, que permite realizar um conjunto de operações matemáticas (valor médio, máximo, mínimo, entre outras) de um parâmetro, num espaço limitado por outra informação geográfica. Neste caso, calculou-se o valor médio de radiação em cada um dos telhados. Em seguida, associou-se esse resultado à *shapefile* das subsecções estatísticas, após o qual se efetuou novamente o mesmo método acima descrito, sendo que desta vez foi calculado o valor médio da radiação para cada BGRI, tendo em conta os valores médios para os telhados dos edifícios presentes em cada uma delas. Esta metodologia, de forma simplificada, é apresentada no fluxograma abaixo.

O modelo solar resultante é apresentado na Figura 44, apresentando o valor de radiação para cada subsecção estatística.

Como a radiação é calculada para os telhados, em BGRI em que não existem edifícios, os valores nestas seriam nulos, sendo esta a razão pela qual estas BGRI foram extraídas (representadas nos mapas por espaços em branco).

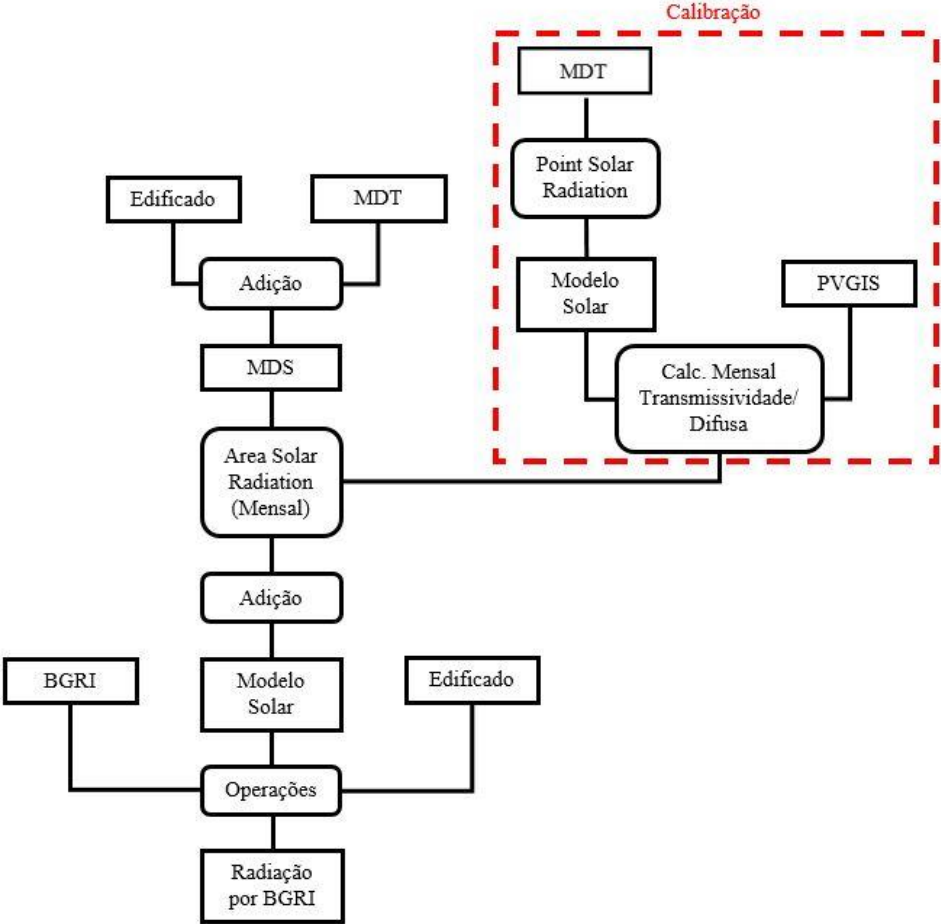


Figura 42 - Fluxograma com o processo de criação e calibração do modelo solar

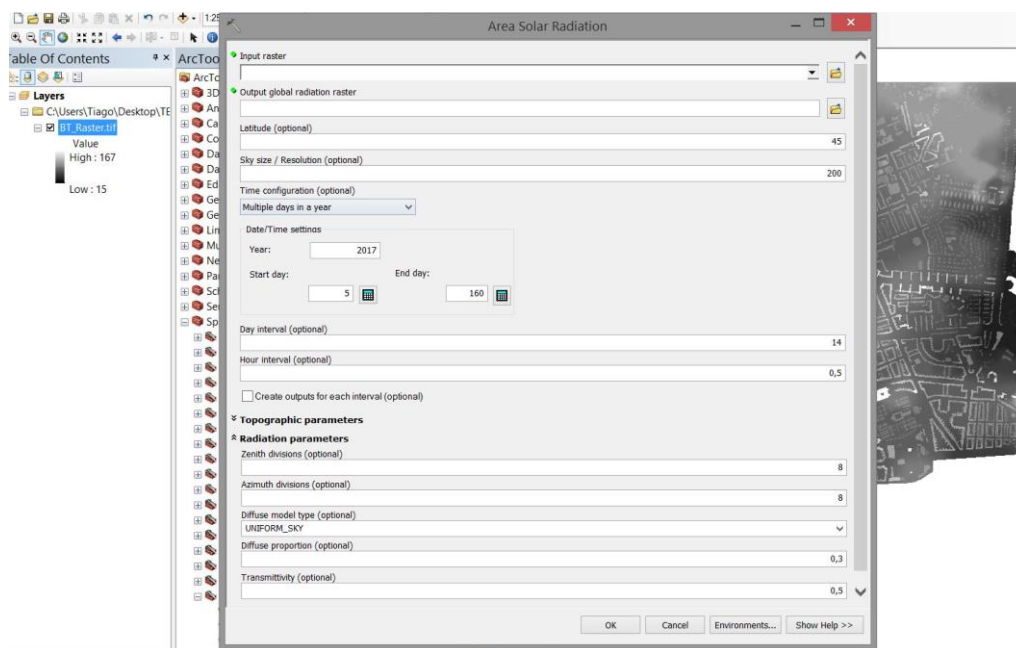


Figura 43 - Ferramenta Area Solar Radiation (*Solar Analyst*) do ArcMap 10.4

Utilizando esta interface do ArcMap, é possível calcular a radiação solar numa área, sendo necessário, para isso, adicionar uma camada de informação em formato *raster*, sendo neste caso o Modelo Digital de Superfície (criado através da junção dos valores de altitude do terreno com os valores da altura dos edifícios). Após este passo, é necessário preencher um conjunto de informações opcionais: latitude do local, neste caso a latitude de Lisboa em graus decimais (valor determinado automaticamente, uma vez que todas as camadas de informação estavam projetadas no mesmo sistema de coordenadas); configuração de tempo de cálculo (no caso em estudo, o cálculo é feito mês a mês); e por fim a proporção de radiação difusa e da transmissividade, valor estes que foram variados mês a mês de acordo com os resultados obtidos através da calibração com o PVGIS. Os restantes parâmetros foram deixados por *default*.



Figura 44 - Valores de médios de radiação nos telhados, por subsecção estatística, expressos em kWh/m<sup>2</sup>/ano, de acordo com o modelo solar criado

### 3.5 Análise de correlação espacial das variáveis em estudo

Após a determinação e mapeamento dos diversos descritores de forma urbana, é necessária uma análise estatística e espacial da relação entre cada parâmetro e a radiação média em cada subsecção censitária. Esta análise foi realizada no *software GeoDa*. (Anselin *et al.*, 2006) (University of Chicago, 2016)

Após uma análise visual preliminar proporcionada pelos diferentes mapas temáticos, procedeu-se a uma análise mais minuciosa da relação entre a radiação e cada descritor. Para isto foram realizados uma série de gráficos de dispersão que contêm parâmetros que permitem prever quais os descritores com maior e melhor relação com a radiação solar. Este passo é importante para a formulação do modelo abordado mais à frente. Esta análise é importante pois permite verificar a existência de descritores de morfologia urbana que não sejam relevantes para a construção do modelo, ou, por terem valores pouco aceitáveis, teriam de ser excluídos do estudo. Esta filtragem pretendia conseguir um modelo mais ajustado e confiável, além de que permitiria que fossem criados e estudados novos, e mais relevantes, parâmetros de morfologia urbana.

Analizou-se a relação entre a radiação solar e os diferentes descritores, com o intuito de verificar se algum destes poderia explicar, de forma razoável, o potencial solar, e ser assim utilizado para construir o modelo de regressão linear (função *scatter plot*). Foram ainda analisados quais os parâmetros com maior dependência espacial.

Apresentam-se aqui os gráficos que representam as variáveis com melhor ajuste à radiação. Os gráficos, tanto da relação com a radiação como do Índice de Moran, dos restantes descritores encontram-se no Anexo (página 75).

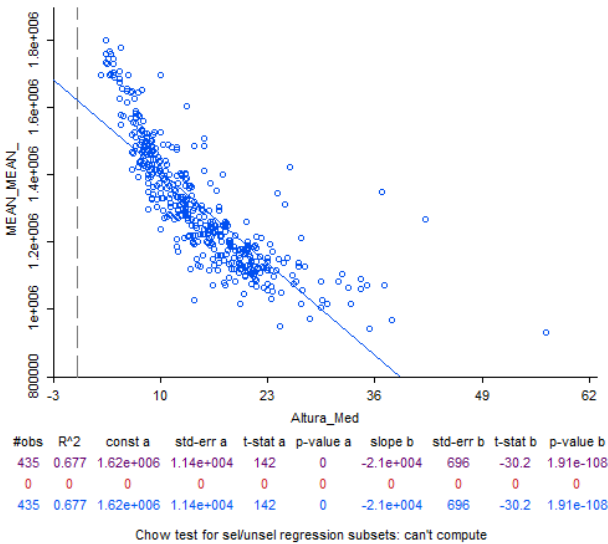


Figura 45 - Relação da radiação com a altura média

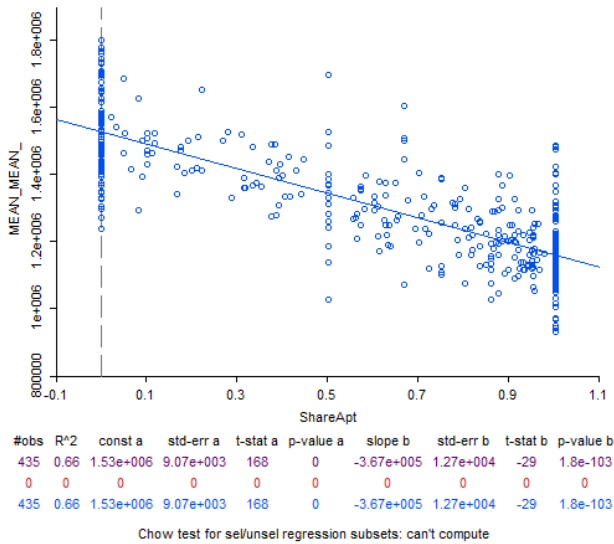


Figura 46 - Relação da radiação com a Proporção de edifícios de apartamentos

Tabela 5 - Análise da relação entre a radiação e os descritores de forma urbana

<b>Descritor</b>	<b>Coefficiente de Determinação (R<sup>2</sup>)</b>
<b>Proporção de moradias isoladas</b>	0,33
<b>Proporção de moradias geminadas</b>	0,23
<b>Proporção de apartamentos</b>	0,66
<b>Altura média dos edifícios</b>	0,68
<b>Desvio padrão da altura média dos edifícios</b>	0,19
<b>Proporção de área coberta por edifícios (Plot ratio)</b>	0,051
<b>Proporção de área coberta por rede viária</b>	0,081
<b>Proporção de área coberta por zonas verdes</b>	0,21
<b>Proporção de área coberta por estacionamento</b>	0,0037
<b>Proporção de área coberta por outros pavimentos</b>	0,0079
<b>Área total edificada</b>	0,0062
<b>Área da BGRI</b>	0,071
<b>Volume médio dos edifícios</b>	2,74x10 <sup>-5</sup>
<b>Perímetro médio dos edifícios</b>	0,021
<b>Orientação média dos edifícios</b>	0,0079

Analisando a Tabela 5, verifica-se que os descritores com uma melhor relação com a radiação solar são a altura média dos edifícios e a proporção de edifícios de apartamentos uma vez que apresentam valores de R<sup>2</sup> superiores a 0,65 (0,677 e 0,66, respetivamente). Prevê-se por isso que estes parâmetros sejam os mais relevantes para o modelo, devido ao seu menor erro.

Tal como foi descrito no Capítulo 1 – Introdução, o principal intuito deste trabalho era encontrar um modelo que pudesse explicar o potencial solar através de um conjunto de descritores de forma urbana. Para isso foi necessário criar um modelo do tipo:

$$Y = A_1X_1 + A_2X_2 + \dots + A_nX_n + constante \quad [10]$$

em que Y, a variável dependente, representa a radiação solar; A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, ..., A<sub>n</sub>, representam os coeficientes de cada descritor de forma urbana encontrados através do modelo de regressão; X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, ..., X<sub>n</sub>, representam os valores das variáveis independentes (i.e. os vários descritores de forma urbana) em cada BGRI; e, por fim, a constante, também ela resultante do modelo de regressão linear.

O modelo que permite o cálculo do potencial solar tendo em conta apenas a morfologia de uma cidade foi obtido através de uma regressão linear no GeoDa. Esta análise seguiu os passos descritos no fluxograma da Figura 47.

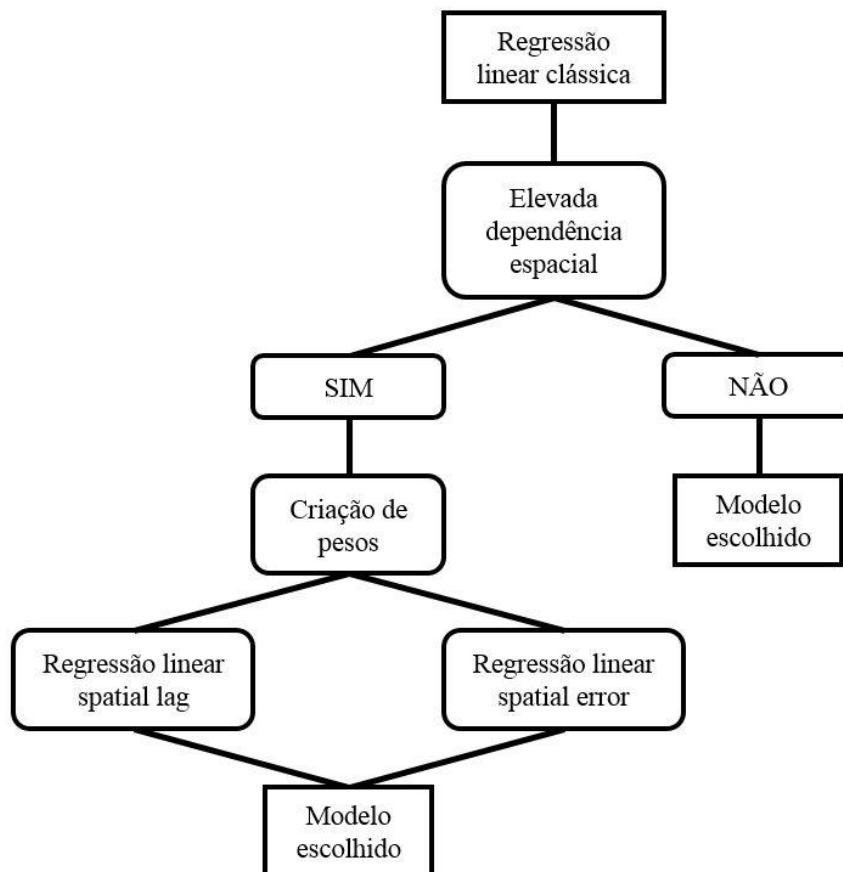


Figura 47 - Fluxograma do procedimento de escolha do modelo de regressão linear a utilizar

Começou-se por testar o modelo de regressão clássico considerando como variável dependente a radiação média por BGRI e como variáveis independentes os 15 descritores de forma urbana descritos anteriormente na Tabela 3. O modelo de regressão linear numérica sem componente espacial é o primeiro a ser testado, uma vez que permite averiguar se há uma dependência espacial, o que indicaria a necessidade de utilizar os modelos de regressão *spatial lag* e *spatial error*. Se houver dependência espacial, estes últimos modelos são os mais indicados para a obtenção de um modelo mais preciso.

Os resultados mais relevantes obtidos no modelo de regressão clássico apresentam-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados do modelo de regressão clássica

<b>Variável</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Probabilidade</b>
<b>Constante</b>	1506130	0
<i>Proporção</i> moradias isoladas	213200,2	0
<i>Proporção</i> moradias geminadas	155821,2	0,00002
<i>Proporção</i> edifícios apartamentos	-11415,88	0,75
<b>Altura média</b>	-11666,66	0
<b>Desvio padrão da altura média</b>	-2652,391	0,041
<i>Plot ratio</i>	-58124,99	0,097
<i>Proporção</i> de área ocupada por rede viária	-131409,4	0
<i>Proporção</i> de áreas verdes	69830,66	0,00002
<i>Proporção</i> de área ocupada por estacionamento	12376,34	0,79
<i>Proporção</i> de área ocupada por outros tipos de pavimentos	-47911,26	0,058
<b>Área total edificada</b>	0,05386602	0,96
<b>Área BGRI</b>	0,2374149	0,18
<b>Volume médio</b>	0,3669667	0
<b>Perímetro médio</b>	34,10491	0,075
<b>Orientação média</b>	-164,6469	0,027
<hr/>		
<b>Teste</b>	<b>Valor</b>	
<b>R<sup>2</sup></b>	0,85	
<b>Log likelihood</b>	-5471,84	
<b>Multicolinearidade</b>	42,13	
<b>Jarque-Bera (Prob)</b>	0	
<b>Moran's I</b>	0,23	
<b>Multiplicador Lagrange (lag)</b>	63,85	
<b>Multiplicador Lagrange (error)</b>	66,13	

Analisando a Tabela 6, verifica-se que a variável dependente pode ser explicada pelas variáveis independentes do modelo, devido ao seu elevado valor de  $r^2$ . No entanto, a probabilidade de algumas variáveis (mais concretamente 7), apresentam valores superiores a 0,05, a partir do qual se considera que estes valores não são significativos, ou seja, considera-se que estas variáveis não têm um impacto relevante na resposta do modelo. Além disso, o valor da multicolinearidade é elevado, concluindo-

se assim que algumas das variáveis independentes não são independentes entre si, o que prejudica o modelo. Este fator pode ser explicado pelo facto de as observações não serem aleatórias, uma vez que se encontram espacialmente distribuídas dentro das fronteiras das BGRI. A baixa probabilidade do teste Jarque-Bera, permite verificar que os resíduos não têm uma distribuição normal, o que seria preferível. Recorrendo aos últimos três testes, os elevados valores do multiplicador de Lagrange e do I de Moran dos resíduos indicam uma forte autocorrelação espacial nos resíduos, o que leva a inferir que existe dependência espacial das variáveis usadas e que um modelo de regressão clássico não contempla todas as relações entre as variáveis independentes e a variável dependente, logo devem-se testar os modelos de regressão com componente espacial, *spatial lag* e *spatial error*.

Para testar estes modelos de regressão linear foi necessário criar um ficheiro com os pesos (matiz de proximidade), de modo a poderem ser realizados os modelos de regressão *spatial lag* e *spatial error*. Foi adicionada uma nova variável (*Poly\_ID*) e escolheu-se como peso de contiguidade *Queen*, com uma ordem unitária.

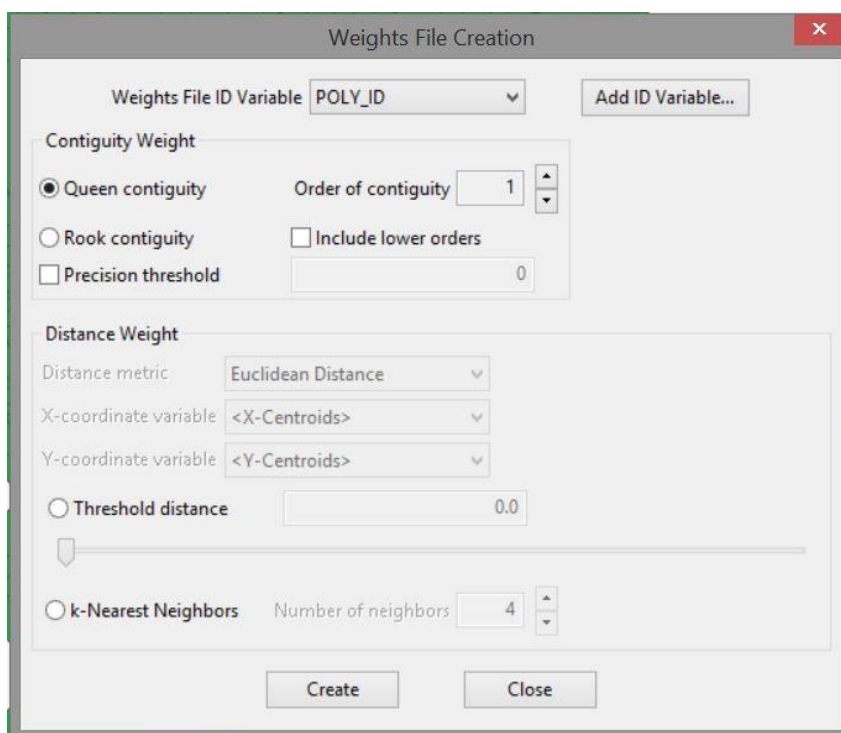


Figura 48 - Interface de criação de pesos no *software* GeoDa



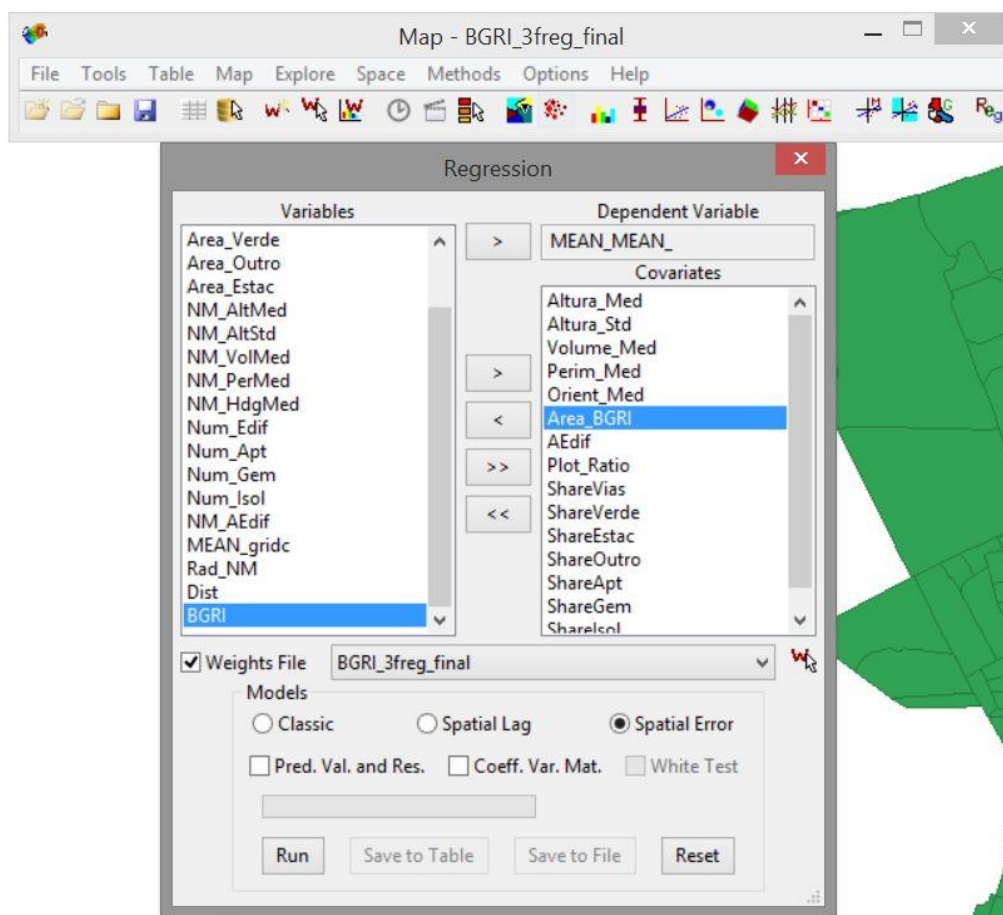


Figura 49 - Interface de criação dos modelos de regressão linear

Nota: A variável dependente (radiação solar) é identificada na interface como “MEAN\_MEAN\_”, uma vez que representa a radiação média nas BGRI, que por sua vez, é a média dos valores de radiação nos telhados.

Apresenta-se em seguida uma síntese dos principais resultados dos três modelos de regressão estudados.

Tabela 7 - Principais resultados dos modelos de regressão

	<b>Clássica</b>	<b><i>Spatial lag</i></b>	<b><i>Spatial Error</i></b>
<b>R<sup>2</sup></b>	0,85	0,87	0,88
<b>Log likelihood</b>	-5471,84	-5442,05	-5437,59
<b>Akaike Info Criterion</b>	10975,7	10918,1	10907,2
<b>Nº variáveis significativas (probabilidade &gt; 0,05)</b>	8	8	10

Pela Tabela 7, é possível verificar uma melhoria dos resultados do modelo de regressão clássica para os modelos com componente espacial. Uma vez que apresenta melhores, apresentam-se na tabela seguinte, apenas os resultados do modelo *spatial error*, apesar do modelo *spatial lag* ter sido igualmente estudado.

Tabela 8 - Resultados do modelo de regressão *spatial error*

Variável	Coefficiente	Probabilidade
Constante	1473927	0
<i>Proporção</i> moradias isoladas	188928,7	0
<i>Proporção</i> moradias geminadas	147248,5	0
<i>Proporção</i> edifícios apartamentos	-32539,67	0,33
Altura média	-9762,716	0
Desvio padrão da altura média	-3306,257	0,0034
<i>Plot ratio</i>	-45173,42	0,17
<i>Proporção</i> de área ocupada por rede viária	-80654,48	0,0064
<i>Proporção</i> de áreas verdes	61977,23	0,00003
<i>Proporção</i> de área ocupada por estacionamento	7554,371	0,86
<i>Proporção</i> de área ocupada por outros tipos de pavimentos	-12180,94	0,63
Área total edificada	-0,6741384	0,47
Área BGRI	0,3934954	0,010
Volume médio	0,3552437	0
Perímetro médio	47,45573	0,0078
Orientação média	-193,0658	0,0042
$\lambda$	0,5821727	0
Teste	Valor	
$R^2$	0,88	
Log likelihood	-5437,59	
Likelihood Ratio	68,49	

Analisando os resultados da Tabela 8, verifica-se um melhor ajuste do modelo aos dados, representado pelo elevado valor do coeficiente de determinação. Este modelo inclui ainda um coeficiente que representa a autocorrelação espacial dos erros ( $\lambda$ ). Além disso, o valor da função de verossimilhança (*Log likelihood*) é superior ao valor obtido no modelo clássico, o que representa uma melhoria do modelo. Apesar de se estar a utilizar um modelo de regressão que tenha em conta a dependência espacial, o elevado valor do *Likelihood Ratio*, indica que os efeitos espaciais ainda se encontram presentes.

Tendo em consideração todos estes fatores, é possível concluir que este é um bom modelo, que permite calcular, com um bom grau de confiança, a radiação solar tendo em conta apenas descritores de forma urbana. Neste estudo, considerou-se este o cenário base, com o qual se obteve um modelo utilizando a constante e coeficientes obtidos durante a regressão linear.

Interessa apenas referir, em termos de comparação, que o modelo de regressão linear *spatial error* apresenta melhor ajuste ( $r^2$ ) e melhor valor de *Log Likelihood* que o modelo *spatial lag*, razão pelo qual se justifica a escolha do primeiro modelo como cenário base.

Utilizando o modelo descrito na Equação 9 e os coeficientes obtidos no modelo de regressão linear *spatial error*, apresentados na Tabela 8, foi possível estimar o potencial solar na área de estudo, que se encontra mapeado na Figura 50. Este é considerado o modelo base, sobre a qual será feita a restante análise nesta dissertação.



Figura 50 - Distribuição espacial, por BGRI, dos valores estimados de radiação solar nos telhados na área de estudo, expressos em kWh/m<sup>2</sup>/ano

## Capítulo 4 – Discussão

Neste capítulo pretende-se analisar os resultados obtidos no decorrer do trabalho.

A criação de um modelo de cálculo do potencial solar tendo apenas em conta os descritores de morfologia urbana, pressupõe inicialmente a criação de um modelo de radiação solar, tendo apenas como função a validação do modelo criado com os parâmetros morfométricos. O modelo solar permitiu determinar a radiação anual recebida nos telhados dos edifícios localizados na área de estudo. A ferramenta *Solar Analyst* do *ArcGIS* apresenta algumas limitações em relação a outros modelos solares, uma vez que ao considerar constantes alguns parâmetros, não reflete com exatidão a realidade. Foi necessária então a calibração do modelo solar com base em valores referência importados do *PVGIS*. Esta calibração permitiu uma diminuição significativa da variação dos valores de radiação anual em relação aos valores obtidos pelo *PVGIS*.

A partir de diversa informação cartográfica foi possível determinar os parâmetros utilizados para a criação do modelo. De modo a permitir uma avaliação preliminar da importância dos parâmetros, foram criados uma série de mapas que permitem relacionar visual, numérica e espacialmente a radiação e os descritores de forma urbana. Nestes mapas é possível observar a distribuição dos 15 parâmetros pelas subsecções censitárias que compõem a área de estudo, encontrando áreas onde os parâmetros melhor se relacionam com a radiação solar.

A relação entre a radiação e os diversos descritores que descrevem a morfologia urbana é depois analisada de uma forma mais pormenorizada, recorrendo à análise dos gráficos de dispersão e de correlação.

Por este tipo de gráficos (Figura 45, Figura 46 e Anexos) é possível estudar o quão bem explicada pode ser a variação da radiação com os diversos parâmetros, verificando a grandeza do coeficiente de determinação e se a relação é positiva ou negativa. Dos 15 parâmetros estudados, apenas 2 apresentaram valores de  $r^2$  aceitáveis, ou seja, superiores a 0,6. Analisando a Tabela 5, verifica-se que o parâmetro com uma melhor relação com a radiação é a altura média dos edifícios.

Analisando os gráficos de correlação espacial, é possível analisar qual a dependência espacial da radiação em relação aos parâmetros. Verifica-se que pouco mais de metade dos descritores, têm uma forte autocorrelação espacial, caracterizados por valores significativos do I de Moran, sendo que o que apresenta maior autocorrelação espacial é a proporção de edifícios de apartamentos.

Após a análise de todos os parâmetros, procedeu-se à criação de um modelo de regressão linear. O cenário base deste trabalho utiliza todas as BGRI da área de estudo e utiliza como variáveis independentes todas os parâmetros descritos na Tabela 3.

Apesar de apenas 2 dos 15 parâmetros apresentarem valores elevados de  $r^2$  e de metade dos parâmetros terem uma correlação espacial significativa com a radiação, a regressão linear clássica obteve resultados considerados aceitáveis a nível de ajuste ( $r^2=0,85$ ). No entanto, revelou valores elevados de multicolinearidade, indicando que alguns dos parâmetros não são independentes entre si. Um exemplo disto é a altura média e a tipologia de edifícios, sendo que valores mais elevados significam uma maior proporção de edifícios de apartamentos e valores mais baixos representam uma maior proporção de moradias. No resultado deste modelo de regressão, sobressaiu ainda a forte dependência espacial, caracterizada por valores significados tanto do I de Moran sobre os resíduos como de ambos os multiplicadores de Lagrange.

Esta foi a razão pela qual não se aceitou o modelo de regressão clássico e se procedeu ao estudo dos modelos *spatial lag* e *spatial error*. Após a realização dos dois modelos, verificou-se que o modelo que melhor se ajustava era o *spatial error*, uma vez que apresentava melhores valores de coeficiente de determinação e função de verossimilhança. Em relação ao modelo clássico de regressão, conseguiu-se uma melhoria de 3,5% no ajuste. Apesar de se estar perante um modelo que tem em conta a dependência espacial, ainda se verifica um efeito espacial significativo nos erros. Além disso, nota-se que apenas 10 dos parâmetros têm uma elevada significância para o modelo, como mostram os reduzidos valores de probabilidade referidos na Tabela 8.

Devido aos resultados satisfatórios, tomou-se este modelo como referência (modelo base), sendo os seus coeficientes utilizados na construção do modelo que permite calcular o potencial solar na área de estudo.

Para permitir uma melhor análise, tentaram encontrar-se estratégias de aperfeiçoamento do modelo. Para isso foi construído um modelo de regressão linear clássica utilizando como variável dependente a radiação média e como variáveis independentes os parâmetros com melhor ajuste à radiação, neste caso, a altura média e a proporção de edifícios de apartamentos. Os resultados deste modelo simplificado (assim denominado por serem utilizadas menos variáveis independentes) são apresentados em seguida.

Tabela 9 - Resultados do modelo de regressão linear clássico (Modelo simplificado)

Variável	Coefficiente	Probabilidade
Constante	1607996	0
Proporção edifícios apartamentos	-196708,2	0
Altura média	-12334,84	0

Teste	Valor
R <sup>2</sup>	0,75
Log likelihood	-5581,31
Multicolinearidade	7,63
Jarque-Bera (Prob)	0
Moran's I	0,33
Multiplicador Lagrange (lag)	85,18
Multiplicador Lagrange (error)	137,81

As maiores diferenças para o modelo base é a elevada significância dos dois parâmetros do modelo e a maior independência entre as variáveis (baixo valor de multicolinearidade). No entanto, existe relação entre estas duas variáveis, uma vez que a presença significativa edifícios de apartamentos significa também que a média de alturas nessa subsecção são também mais elevadas.

Pode ainda referir-se o facto de ter sido previsível que se pudesse recorrer a estes dois descritores de forma urbana para estimar a radiação solar, uma vez que apresentavam coeficientes de determinação aceitáveis (Figura 45 e Figura 46), provando assim a utilidade de se ter testado a relação todos os descritores de forma urbana com a radiação solar antes de construir o modelo.

Tal como no modelo base, este modelo apresenta valores aceitáveis de ajuste, com um  $r^2$  de 0,75. Além disso, os testes mostram que os erros deste modelo não têm uma distribuição normal (baixa probabilidade no teste Jarque-Bera) e existe uma forte autocorrelação espacial (valores significativos de I de Moran e dos multiplicadores de Lagrange). Sendo assim, é necessário testar os modelos de regressão linear que tenham em conta a dependência espacial.

Após testar os modelos de *spatial lag* e *spatial error*, conclui-se que o segundo apresenta um melhor ajuste. Os resultados obtidos para este teste apresentam-se em seguida.

Tabela 10 - Resultados do modelo de regressão linear spatial error

Variável	Coefficiente	Probabilidade
Constante	1580792	0
Proporção edifícios apartamentos	-198687,5	0
Altura média	-11038.64	0
$\lambda$	0,5920837	0

Teste	Valor
$R^2$	0,82
Log likelihood	-5532,27
Likelihood Ratio	98,29

Em relação ao modelo de regressão linear clássico, este modelo apresenta um melhor coeficiente de determinação. Apesar disso, o valor de  $r^2$  é inferior em relação ao obtido no cenário base, apresentando ainda um maior efeito espacial no modelo. O aperfeiçoamento mais notável é a alta significância dos dois descritores escolhidos (derivado de existirem apenas dois descritores).

Para melhor analisar os resultados e fiabilidade do modelo, é essencial efetuar a verificação do modelo utilizado e dos resultados obtidos. No âmbito desta dissertação de mestrado foi possível testar a performance do modelo de duas formas:

- 1) Utilizando modelos e valores independentes (de modo a não “viciar” os resultados);
- 2) Utilizando o modelo base, utilizando apenas dados de subdivisões da área de estudo.

De modo a possibilitar estas verificações, a área de estudo original foi dividida em 4 subáreas: A, B, C e D, como apresentado nos mapas da Figura 51. A divisão da área de estudo foi arbitrária (dividindo a meio da área de estudo), tentando assim evitar o aumento ou diminuição do peso de um ou mais descritores de forma urbana. Com isto, são garantidas a heterogeneidade do edificado nestas subdivisões da área de estudo e a maximização da independência do modelo. A cada subárea foi então aplicada a metodologia utilizada para obter o modelo base.

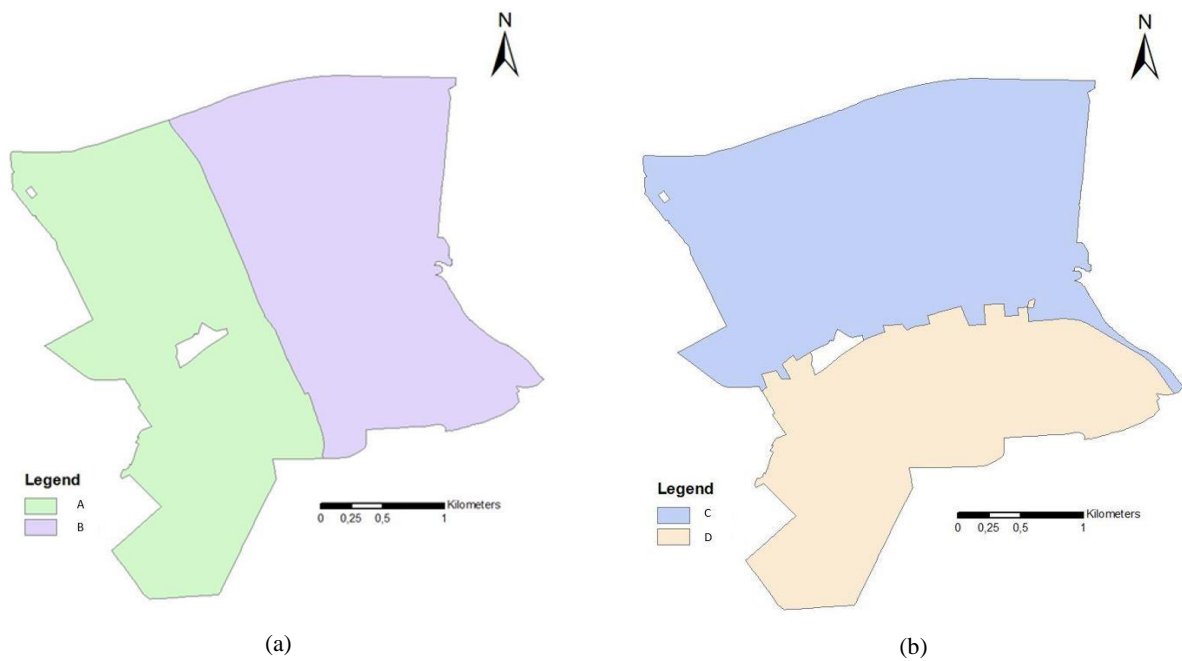


Figura 51 - Divisão da área de estudo em quatro subáreas (a e b)

De referir que no caso da validação do modelo base, não é possível fazer uma verificação 100% independente, uma vez que o modelo foi criado tendo em conta alguns dos dados utilizados na sua verificação. Ao reduzir a área de estudo para sensivelmente metade, pretende-se criar o efeito de uma nova área independente, uma vez que o modelo foi criado com um conjunto muito mais abrangente de dados.

Tabela 11 - Resultados da verificação da metodologia

Área estudo	Modelo utilizado	Modelo regressão	Erro <sub>médio</sub>	Desvio padrão	R <sup>2</sup>
A	B	Spatial Error	4,72%	4,91%	0,91
B	A	Spatial Error	5,08%	13,47%	0,88
D	C	Spatial Error	4,96%	4,37%	0,93
C	D	Spatial Error	4,49%	5,07%	0,82

Tabela 12 - Resultados da verificação do modelo

	Modelo base				
	A	B	C	D	Lisboa
<b>Erro Médio</b>	4,22%	3,95%	3,74%	4,29%	4,06%
<b>Erro Máximo</b>	22,89%	19,94%	19,56%	22,89%	22,89%
<b>Erro Mínimo</b>	0,06%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%
<b>Erro &gt;10%</b>	8,52%	6,18%	4,10%	9,62%	7,13%
<b>Erro &gt;15%</b>	3,98%	0,77%	0,51%	3,35%	2,07%
<b>Erro &gt;20%</b>	1,14%	0,00%	0,00%	0,42%	0,46%
<b>Desvio padrão</b>	4,05%	3,39%	3,18%	4,00%	3,67%

Pela Tabela 11, verifica-se que o erro médio dos resultados é relativamente baixo em todos os cenários apresentados, além de serem bastante semelhantes entre si. Com isto mostra-se que a metodologia é consistente e apresenta valores aceitáveis, logo a metodologia é válida.

Foi calculada a expressão dos erros na área de estudo, ou seja, a quantidade de vezes que se verificam erros acima de 10%, 15% e 20%, em proporção para o número total de BGRI da área de estudo.

De referir apenas os valores observados no modelo A aplicado à subárea B, que são um pouco superiores aos restantes. Esta diferença deve-se ao facto de nesta subárea estar incluída a subsecção estatística na qual está instalado o edifício-sede da Caixa Geral de Depósitos, edifício este que tem características de edificado consideravelmente diferentes das restantes. Pelo facto de a subárea ter um menor número de subsecções estatísticas (259 em vez de 435 da área de estudo original), faz com que tenha um maior peso no modelo, alterando por isso o erro máximo e o desvio padrão dos valores.

A segunda etapa da verificação do comportamento do modelo, passou por se verificarem os resultados do modelo base. Tal como acima mencionado, ao recorrer-se ao conjunto de dados com o qual foi construído o modelo para validar o mesmo, corre-se o risco de “viciar” o modelo, podendo assim apresentar valores mais positivos do que o são na realidade. De modo a contrariar este facto, o modelo base foi aplicado às quatro subáreas em vez da totalidade a área de estudo, cujos resultados obtidos são apresentados na Tabela 12. Nesta tabela é possível verificar que os diferentes parâmetros estudados apresentam valores bastante próximos nas diferentes subáreas, mostrando mais uma vez a consistência do modelo. Além disso, como tanto o erro médio como o desvio padrão apresentam valores considerados baixos, é possível também concluir que o modelo base é válido. Nesta tabela, são ainda apresentadas, na última coluna, estatísticas da aplicação do modelo base em toda a área de estudo, para efeitos de comparação. Os valores apresentados são concordantes com a aplicação deste modelo às quatro subáreas, validando as conclusões deste estudo.

Apesar de o modelo base ter algumas desvantagens em relação a esta versão simplificada do modelo, o primeiro permite calcular a radiação na área de estudo com menor erro. Para se chegar a esta conclusão, foi realizada uma verificação envolvendo toda a área de estudo, num universo total de 435 divisões censitárias, usando os dois modelos. Os resultados da verificação apresentam-se na Tabela 13.



Tabela 13 - Comparação dos resultados entre o modelo base e o modelo simplificado

	Modelo	
	Base	Simplificado
<b>Erro Médio</b>	4,06%	5,02%
<b>Erro Máximo</b>	22,89%	29,21%
<b>Erro Mínimo</b>	0,01%	0,07%
<b>Erro &gt;10%</b>	7,13%	12,64%
<b>Erro &gt;15%</b>	2,07%	3,68%
<b>Erro &gt;20%</b>	0,46%	0,92%
<b>Desvio padrão</b>	3,67%	4,47%

Como é possível verificar, ao utilizar o modelo simplificado, o erro médio aumenta pouco menos de um ponto percentual em relação ao modelo base, assim como aumenta o número de BGRI onde o erro é maior (verificam-se erros acima de 10% em cerca de 75 BGRI em vez de 42 BGRI que se verificam no modelo base).

Atendendo ainda ao erro médio, e comparando os resultados dos modelos de regressão linear e do modelo solar, pode verificar-se a precisão das regressões obtidas, em especial do cenário base. Sarralde *et al.* (2015) apresenta, para os telhados um erro médio inferior (0,84%). Isto pode dever-se ao facto do edificado na cidade de Londres ser um pouco mais homogéneo que o de Lisboa.

O potencial solar para a totalidade da área de estudo (calculado no modelo solar) perfaz cerca de 2,9 TWh/ano, e, considerando os erros médios dos modelos base e simplificado, verifica-se uma diferença de 118 e 146 MWh/ano, respetivamente.

Comparando o erro médio dos modelos base e simplificado, pode considerar-se que o erro não é significativo o suficiente para impedir a utilização de um modelo simplificado. Este tipo de modelo pode ser bastante apelativo uma vez que reduz o número de descritores a determinar de quinze para dois, trazendo vantagens no momento do levantamento e tratamento de dados. Ainda que apelativo, foi decidido que este estudo focaria apenas o modelo base, uma vez que, ao contemplar mais descritores de forma urbana, se conseguiria um modelo mais abrangente, ou seja, passível de ser utilizado em mais cidades, tal como é um dos objetivos deste trabalho. Além disso, é também o modelo que apresenta melhor ajuste entre a radiação solar e os diferentes parâmetros de morfologia urbana.

É pertinente ainda fazer uma comparação visual, numérica e espacial entre o mapeamento da radiação solar nos telhados obtido a partir do modelo solar e do modelo de regressão linear, informação que é apresentada em seguida.

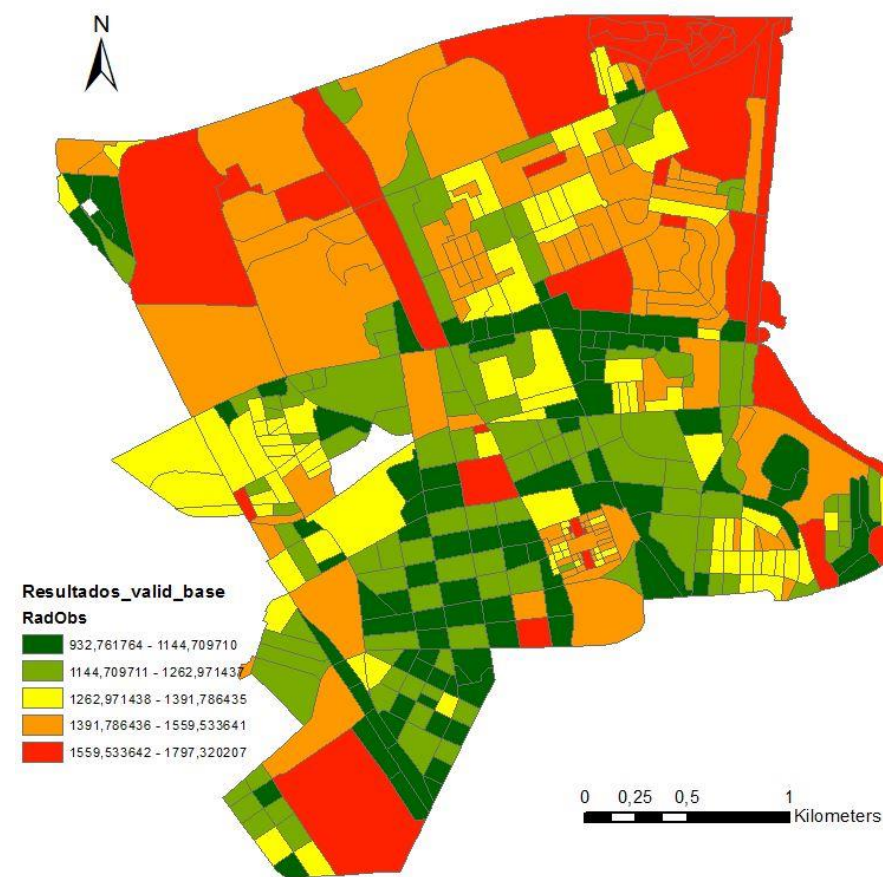


Figura 52 - Valores de radiação nos telhados, obtidos pelo modelo solar (Valores em kWh/m<sup>2</sup>/ano)

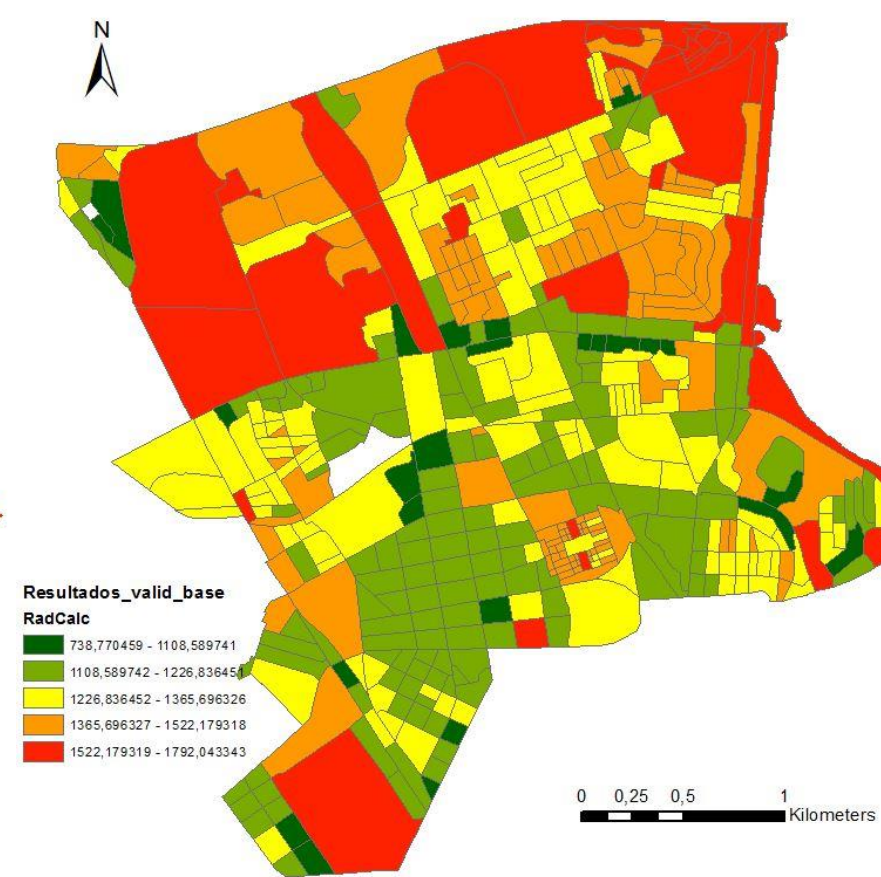


Figura 53 - Valores de radiação nos telhados, obtidos pelo modelo de regressão linear (Valores em kWh/ m<sup>2</sup>/ano)

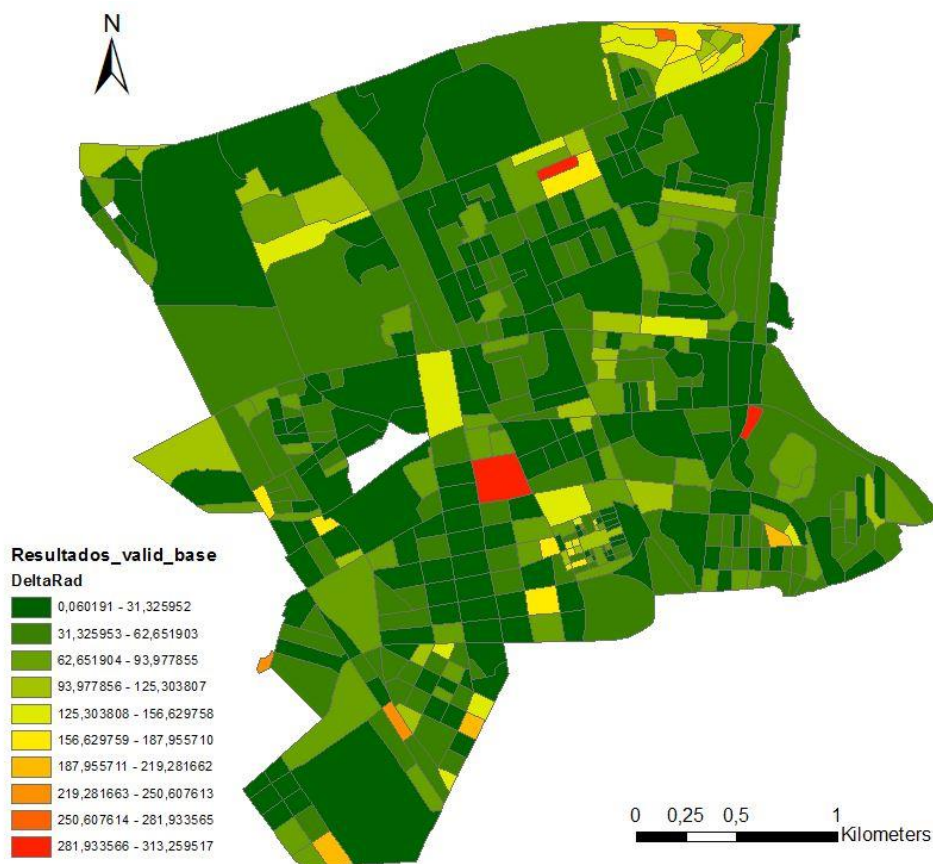


Figura 54 – Diferença (em módulo) entre valores de radiação obtidos pelo modelo solar e pelo modelo de regressão linear (Valores em kWh/ m²/ano)

A Figura 54 permite fazer uma comparação efetiva entre a Figura 52 e a Figura 53, mostrando a diferença na estimativa do potencial solar calculado de duas formas diferente, para cada subsecção estatística. Visualmente, permite concluir que na grande maioria das subsecções, a diferença na estimativa do potencial solar calculada pelo modelo solar e pelo modelo de regressão linear (modelo base) é baixa (BGRI realçadas a verde). Numericamente, verifica-se que a diferença máxima situa-se nos 313 kWh/m²/ano. Fazendo uma análise global, conclui-se que estas conclusões estão em concordância com a análise dos valores absolutos e do erro médio (primeira coluna da Tabela 13).

Para completar a validação do modelo, seria necessária a utilização de um conjunto de dados independentes, ou seja, dados de uma área de estudo completamente diferente. No entanto, no decorrer desta dissertação isso não foi possível, por não existir outro conjunto de dados (área de estudo) disponíveis.

Estudaram-se ainda um conjunto de cenários adicionais de modo a permitir a criação de um modelo que se ajustasse a zonas específicas da cidade. Para isto selecionaram-se divisões censitárias que partilhassem valores elevados ou reduzidos de um certo parâmetro, formando amostras da área de estudo. Depois foi seguida a metodologia utilizada nesta dissertação, culminando com a criação dos modelos de regressão. Os cenários criados encontram-se descritos na Tabela 14.

Tabela 14 - Cenários adicionais

<b>Cenários</b>	<b>Subcenários</b>
<b>Altura média</b>	Maior
	Menor
<b>Desvio padrão da altura média</b>	Maior
	Menor
<b>Área da BGRI</b>	Maior
	Menor
<b>Área total edificada</b>	Maior
	Menor
<b>Plot Ratio</b>	Maior
	Menor
<b>Orientação média</b>	Este/Oeste
	Norte/Sul
<b>Tipologia do edificado</b>	Mais apartamentos
	Mais moradias

Estes cenários poderiam ser utilizados caso não se conseguisse encontrar um bom modelo que permitisse explicar o potencial solar através dos descritores urbanos ou se pretendesse refinar o modelo em certas áreas. A utilização dos cenários adicionais implicaria a criação de vários modelos que se ajustassem a certas porções da área de estudo, indo contra o principal intuito do estudo. Por isso, e apesar de terem sido analisados os cenários adicionais, este estudo debruça-se unicamente sobre o modelo base, uma vez que vai de encontro ao objetivo do trabalho, de encontrar um modelo que permita relacionar a radiação solar com os descritores de forma urbana, com um bom ajuste, para toda a área de estudo.

## Capítulo 5 – Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

Num mundo em que existe uma maior urbanização e uma maior demanda de energia, é necessário encontrar-se formas de maximizar a produção de energia para suprir essa procura. Uma dessas formas é trazer a produção de energia para as cidades, aproximando-a do consumo e aproveitando as vastas áreas de telhados e fachadas disponíveis para a instalação de sistemas de energia solar.

No entanto, os meios urbanos são tipicamente mais complexos, tornando indispensável a utilização de um bom modelo solar que permita aferir corretamente o potencial solar e contornar esta complexidade criada pela morfologia da cidade.

Neste trabalho pretendia-se por isso criar uma metodologia que permitisse a determinação do potencial solar tendo apenas em conta a morfologia urbana de uma cidade. O modelo gerado através de uma metodologia baseada em variáveis morfométricas deveria permitir uma boa estimativa do potencial solar por toda a cidade. Este estudo foi aplicado à cidade de Lisboa, aproveitando por isso a heterogeneidade de edificado existente na cidade.

Os principais objetivos desta dissertação foram cumpridos, uma vez que se verificou que existe dependência espacial entre a radiação solar e a morfologia de uma cidade. Partindo desta premissa, concluiu-se que é possível estimar o potencial solar, tendo em conta um conjunto de descritores de forma urbana.

Para isso foram determinados um conjunto de 15 parâmetros que descrevem a morfologia da cidade, agrupados em 4 categorias. Foi também necessária a criação de um modelo solar a partir de um modelo digital de superfície. Este modelo foi calibrado utilizando parâmetros mensais obtidos comparando os valores do PVGIS com os da ferramenta *Solar Analyst* do *ArcGIS*. Esta calibração permitiu diminuir em 96% o erro no valor da radiação solar estimada pelo *Solar Analyst*.

Em seguida foi estudada a correlação espacial dos parâmetros e da radiação solar, com recurso ao GeoDa. Esta etapa precedeu a criação dos modelos de regressão linear.

Depois da análise do modelo de regressão clássico, verificou-se que os resíduos deste modelo apresentavam uma forte autocorrelação espacial, pelo que induzia que este modelo, que assenta num pressuposto de que as variáveis explicativas são independentes entre si, os resíduos são também independentes e que apresentam uma distribuição Normal  $N(0,1)$ , deveria ser excluído do estudo pois a componente espacial parece interferir na qualidade do modelo e o modelo clássico não a contempla. Dessa forma, foi necessário recorrer a modelos de regressão linear com componentes espaciais: o modelo *spatial error* e *spatial lag*. Com estes modelos verificou-se que era possível explicar o potencial solar de uma cidade com os descritores de forma urbana, com um elevado grau de ajuste ( $r^2=0,88$ ), apesar de uma evidente componente espacial ainda permanecer. O modelo selecionado utiliza a totalidade dos parâmetros na totalidade da área de estudo, sendo por isso considerado o modelo base.

Foi possível verificar o comportamento do modelo recorrendo a conjuntos de dados e modelos de regressão totalmente independentes, tendo para isso sido dividida a área de estudo em quatro subáreas mais pequenas. Efetuou-se ainda outra verificação do modelo de regressão, utilizando dados provenientes das subáreas e aplicando-os ao modelo base. Nestas duas etapas foi possível verificar erros médios relativamente baixos e valores bastante semelhantes nos vários testes estatísticos efetuados.

Propôs-se ainda melhorar e simplificar o modelo de regressão, diminuindo para apenas 2 os descritores de forma urbana (altura média dos edifícios e proporção de edifícios de apartamentos). Estes foram escolhidos por apresentarem a melhor correlação com a radiação solar na área de estudo. Recorrendo novamente ao modelo de regressão linear *spatial error*, verificou-se que apresenta um ajuste menor ( $r^2=0,75$ ) que o modelo base, o que representa o aumento de um ponto percentual no erro médio em comparação com o modelo base (de 4,06% para 5,02%). Este método pode ser interessante se se pretender simplificar o tratamento e levantamento de dados.

Para finalizar, é pertinente fazer uma análise energética da área de estudo. Tendo em conta a população residente (73568 pessoas) (INE, 2011) e um consumo de energia *per capita* de 4583 kWh ao ano (PORDATA, 2016), o consumo de energia elétrica para toda a área de estudo totaliza perto de 337 GWh/ano. Através de da instalação de módulos fotovoltaicos nos telhados, e considerando um potencial solar total de 2,9 TWh/ano, a instalação de módulos fotovoltaicos permitiria produzir 139 GWh/ano, suprimindo assim 41,4% das necessidades energéticas da área de estudo. Este valor é consistente com os resultados obtidos por Gomes (2011), em que, para uma área de estudo com uma latitude semelhante à referida neste estudo, o aproveitamento do potencial solar nos telhados permitiria suprir 48% das necessidades energéticas anuais.

De referir apenas que, tal como em Gomes (2011), na análise energética foram considerados sistemas fotovoltaicos com uma eficiência de 12%. Este valor contabiliza a eficiência típica dos módulos fotovoltaicos, que ronda os 15% (Brito, 2009), tendo em consideração ainda perdas de 25% decorrentes da conversão da energia solar em elétrica (efeitos de temperatura e efeito de Joule), tal como refere Súi *et al.* (2007).

Nestes cálculos foi incluída uma taxa de ocupação máxima dos telhados de 40% (valor arbitrário) de modo a ter em conta:

- O estudo considera os telhados como superfícies horizontais, logo os módulos recebem menos radiação do que se estivessem instalados em ângulo;
- Não se iam preencher os telhados na totalidade com módulos PV, como é o exemplo dos telhados orientados a norte ou com obstáculos;
- Tendo a área de estudo um cariz tanto residencial como de serviços, o consumo de energia é superior ao estimado, logo a contribuição dos sistemas solares PV seria menor.

Assumindo emissões iguais às associadas ao *mix* energético em Portugal no ano de 2017, em que para produzir 1 kWh de energia elétrica foram libertadas cerca de 187,85 g de CO<sub>2</sub> (EDP, 2018), ao serem instalados painéis fotovoltaicos nos telhados da área de estudo, seria possível evitar a emissão de 26 toneladas de CO<sub>2</sub>/ano para a atmosfera.

Este estudo pretendia analisar a relação entre a radiação e a morfologia urbana, tentando encontrar um modelo que explicasse a primeira em função da segunda. Nas condições atuais é possível dizer que este modelo apresenta uma boa performance em Lisboa. No entanto, a utilização deste modelo deve ser efetuada com prudência noutras cidades, devido à sua natureza preliminar. De modo a poder melhorar a metodologia apresentada, recomendam-se em seguida algumas ideias para um futuro trabalho na área:

- Aperfeiçoamento da análise estatística, escolhendo assim os melhores parâmetros e modelos de regressão linear para melhorar o cálculo do potencial solar. Podem ser também filtrados os *outliers* presentes nos gráficos do Anexo I, melhorando assim o modelo;

- No caso de os modelos de regressão não explicarem o potencial solar com precisão para toda a área de estudo, propõe-se reduzir a área de estudo e aplicar os modelos em subáreas que consigam explicar o potencial em zonas mais homogéneas. Isto é possível recorrendo aos cenários adicionais expressos na Tabela 14, ou até pela criação de mais cenários;
- Utilização de um modelo solar mais preciso, de modo a validar com mais precisão os resultados do modelo de regressão;
- Alargar da área de estudo, de modo a verificar uma possível diminuição do erro ou de modo a “universalizar” o modelo, uma vez que vai incluir no modelo mais heterogeneidade do edificado. Um exemplo disto é o facto das diferenças de erro entre este trabalho e o de Sarralde *et al.* (2015), tendo em conta que foram estudadas 435 BGRI contra 4718 LSOA (equivalente às BGRI), respetivamente;
- Determinação de novos descritores de forma urbana:
  - Coeficiente de localização (ponderação da latitude): Pretende-se que este modelo pudesse ser utilizado em qualquer cidade do mundo. No entanto, a radiação solar à superfície da Terra, varia com a latitude. Sendo assim, se os valores de latitude forem bastante diferentes dos de Lisboa, o modelo não calculará com precisão o potencial solar. É necessário, portanto, incluir um termo no modelo que reflita a diferença nas latitudes, permitindo que este seja aplicado globalmente. Este tema foi já referido por Takebayashi *et al.* (2015) e por Aida e Gotoh (1982);
  - Distância média entre edifícios: Um dos parâmetros que foi estudado em Sarralde, 2015, mas que não foi incluído neste estudo, é a distância aos edifícios mais próximos. Este parâmetro é bastante importante para dar a indicação de sombras que edifícios mais altos possam criar em edifícios mais baixos, limitando a radiação solar que estes últimos recebem;
  - Altitude média da BGRI: Tal como o parâmetro anterior, este descritor pode indicar se existe alguma limitação na radiação que os edifícios recebem devido à orografia do terreno;
- Validação para outras cidades: Um dos objetivos a longo prazo deste trabalho é a validação e utilização do modelo apresentado noutras cidades. Para isso seria apenas necessário fazer um levantamento dos parâmetros utilizados neste estudo para essa cidade e depois utilizar o modelo de regressão linear escolhido. Caso o modelo não se ajuste bem, este terá de ser refinado;
- Estudo das fachadas: Apesar de receberem menos radiação que os telhados, as fachadas apresentam grandes áreas em que se podem instalar painéis solares. São assim uma boa oportunidade de desenvolvimento de tecnologias BIPV, maximizando assim o aproveitamento da energia solar.

Este estudo permitiu mostrar a importância da morfologia urbana no potencial solar de uma cidade. Permitiu também mostrar que é possível determinar o potencial solar utilizando ferramentas SIG menos complexas e com menor custo computacional, apresentando resultados aceitáveis à escala em que se desenvolveu o trabalho. Este facto faz com que seja mais fácil a tomada de decisões sobre a instalação, e em que áreas, de sistemas de energia solar, tanto por parte de empresas, instituições ou particulares. Num futuro que se prevê mais quente e mais sedento de energia, todas as atitudes contam para um desenvolvimento mais sustentável.



## Referências

- Aengenheyster, M., Qing, Y., Ploeg, F., Dijkstra, H. (2018). The point of no return for climate action: effects of climate uncertainty and risk tolerance. *Earth Syst. Dynam.*, 9, pp. 1085-1095
- Aguiar, R. (1998). Dados Meteorológicos para Energias Renováveis e URE em Portugal (PCLIMA project). Final report ALTENER XVII/4.1030/Z/98-92).
- Aida, M., Gotoh, K. (1982). Urban albedo as a function of the urban structure - A two-dimensional numerical simulation (Part II). *Boundary-Layer Meteorology*, 23, 4, pp. 415-424
- Anselin, L. (2003). An Introduction to Spatial Regression Analysis in R.
- Anselin, L., Ibnu S., Youngihn K. (2006). GeoDa: An Introduction to Spatial Data Analysis. *Geographical Analysis*, 38, pp. 5-22.
- Associação Portuguesa de Energias Renováveis (APREN) (2018). 2017 Eletricidade Renovável em Revista.
- BP (2018). BP Statistical Review of World Energy 2018.
- Brito, M. C., Gomes, N., Santos, S., Tenedório, J. A. (2012). Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data. *Solar Energy*, 86, pp. 283-288
- Brito, M. C. (2009). Energia solar fotovoltaica. *Urbanismo E Construção*, 688, pp. 8-9
- Câmara Municipal de Lisboa: Juntas de freguesia. (2016). Obtido de <http://www.cm-lisboa.pt/municipio/juntas-de-freguesia>
- Carneiro, C. (2011). Extraction of urban environmental quality indicators using LiDAR-based digital surface models. Tese Doutoramento. École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- DGT - Direção Geral do Território (2014): CAOP – Carta Administrativa Oficial de Portugal. Obtido de [http://www.dgterritorio.pt/cartografia\\_e\\_geodesia/cartografia/carta\\_administrativa\\_oficial\\_de\\_portugal\\_caop/\\_caop\\_\\_download\\_/](http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/cartografia/carta_administrativa_oficial_de_portugal_caop/_caop__download_/)
- DGT - Direção Geral do Território (2006): PT-TM06/ETRS89 - European Terrestrial Reference System 1989. Obtido de [http://www.dgterritorio.pt/cartografia\\_e\\_geodesia/geodesia/sistemas\\_de\\_referencia/portugal\\_continental/pt\\_tm06\\_etr89\\_\\_\\_european\\_terrestrial\\_reference\\_system\\_1989\\_2/](http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/geodesia/sistemas_de_referencia/portugal_continental/pt_tm06_etr89___european_terrestrial_reference_system_1989_2/)
- EDP Comercial: Emissões CO2 em Portugal em 2017 (2018). Obtido de <https://www.edp.pt/particulares/apoio-cliente/origem-energia/?sector=Total%20EDP%20Comercial&year=2017&period=0>



ESRI (2018): Lidar point classification. Obtido de <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.4/manage-data/las-dataset/lidar-point-classification.htm>

Freitas, S., Catita, C., Redweik, P., Brito, M. C. (2015). Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, pp. 915–931

Fu, P., Rich, P. M. (2000). A geometric solar radiation model and its applications in agriculture and forestry. *Proceedings of the Second International Conference on Geospatial Information In Agriculture And Forestry*. pp. 357-364.

Geirinhas, J. (2001). Conceitos e Metodologias: BGRI – Base Geográfica de Referenciação de Informação, *Revista de Estudos Regionais – Região de Lisboa e Vale do Tejo*, 2º Semestre, Instituto Nacional de Estatística

GeoDa: Documentation. Obtido de <http://geodacenter.github.io/documentation.html>

GeoDa: Exploring Spatial Data with GeoDa™ : A Workbook. Obtido de <https://s3.amazonaws.com/geoda/software/docs/geodaworkbook.pdf>

Guimarães, S. (2014). Mapeamento do potencial solar em ambiente urbano. Tese de Mestrado. Universidade de Lisboa.

Global Solar Atlas: Mapa global de irradiação (2016). Obtido de <http://globalsolaratlas.info/>

Gomes, N. (2011). Integração de Dados LiDAR com Imagens de Muito Alta Resolução Espacial para Determinação de Áreas Urbanas com Potencial Solar. Tese de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa

Governo Português (2018): Portugal 2020. Obtido de <https://www.portugal2020.pt/Portal2020/portugal-quer-triplicar-a-producao-de-energia-solar-ate-2020>

Hoogwijk, M., Graus, W. (2008). Global Potencial of Renewable Energy Sources: A Literature Assessment. *REN21 - Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2015). *Climate Change 2014 Synthesis Report Summary for Policymakers*.

International Energy Agency (IEA) (2017). *Renewables 2017 – Analysis and forecasts to 2022*.

Instituto Nacional de Estatística (INE) (2011): Censos 2011 Importação dos principais dados alfanuméricos e geográficos (BGRI). Obtido de <http://mapas.ine.pt/download/index2011.phtml>

Martins, T., Adolphe, L., Bastos, L., Martins, M. (2016). Sensitivity analysis of urban morphology factors regarding solar energy potential of buildings in a Brazilian tropical context, *Solar Energy* 137, pp. 11–24

Millar, R., Fuglestvedt, J., Friedlingstein, P., Rogelj, J., Grubb, M., Matthews, H., Skeie, R., Forster, P., Frame, D., Allen, M. (2017). Emission budgets and pathways consistent with limiting warming to 1,5°C, Nature Geoscience.

MIT News (Massachusetts Institute of Technology): Potencial da Energia Solar (2011). Obtido de <http://news.mit.edu/2011/energy-scale-part3-1026>

PORDATA – Base de Dados Portugal Contemporâneo (2016): Consumo de energia elétrica per capita. Obtido de <https://www.pordata.pt/Portugal/Consumo+de+energia+el%C3%A9ctrica+per+capita+total+e+por+tipo+de+consumo-1230-10019>

Redweik, P., Catita, C., Brito, M. C. (2013). Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. Solar Energy, 97, pp. 332–341

Sarralde, J. J. (2015). Solar Energy and urban morphology: Scenarios for increasing renewable energy potencial in neighborhoods in London. Renewable Energy, 73, pp. 10-17

Shaw, C. (2017). The Two Degrees Celsius Limit. Oxford Research Encyclopedia of Climate Science.

Šúri M., Huld T.A., Dunlop E.D. (2005). PV-GIS: a web-based solar radiation database for the calculation of PV potential in Europe. International Journal of Sustainable Energy, 24, pp. 55-67

Súri, M., Huld, T. A., Dunlop, E. D., Ossenbrink, H. A. (2007). Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. Solar Energy, 81, pp. 1295–1305.

Takebayashi, H., Ishii E., Moriyama, M., Sakaki A., Nakajima S., Ueda, H. (2015). Study to examine the potential for solar energy utilization based on the relationship between urban morphology and solar radiation gain on building rooftops and wall surfaces. Solar Energy, 119, pp. 362–369

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2015). Adoption of the Paris Agreement.

Anexos

I – Análise da relação entre os diferentes descritores e a radiação solar

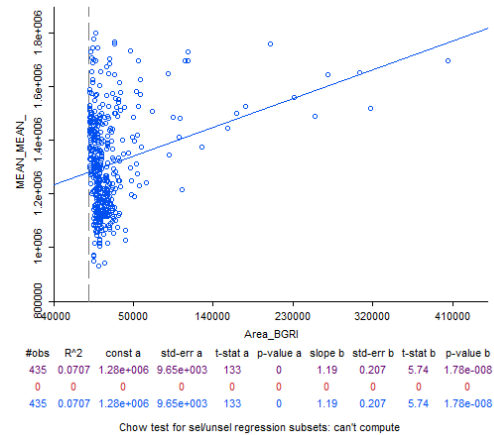


Figura 55 - Relação da radiação com a área das BGRI

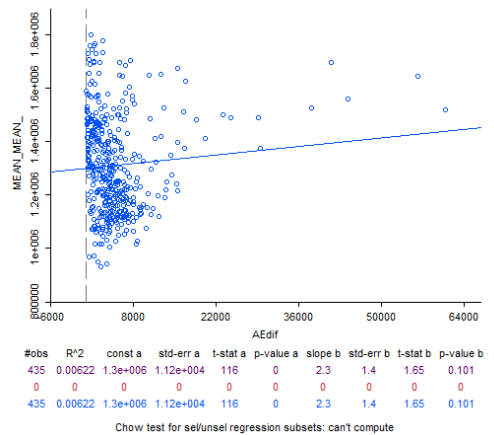


Figura 56 - Relação da radiação com a área total edificada

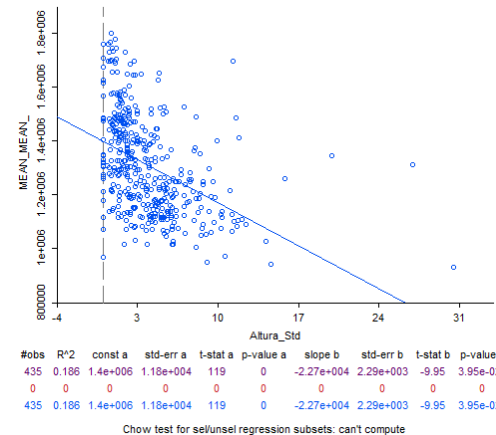


Figura 57 - Relação da radiação com o desvio padrão da altura média

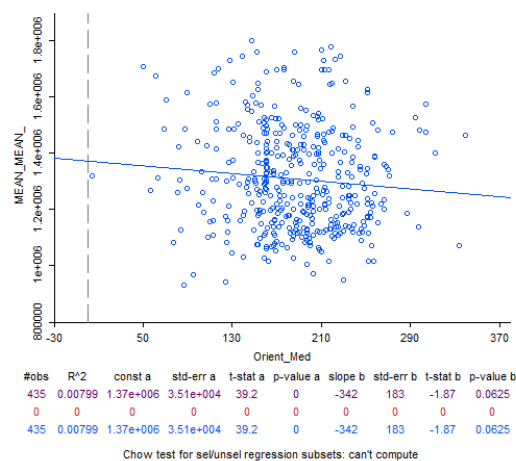


Figura 58 - Relação da radiação com a orientação média dos edifícios

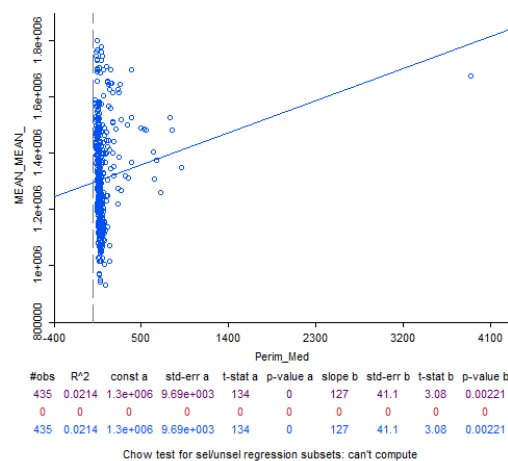


Figura 59 - Relação da radiação com o perímetro médio

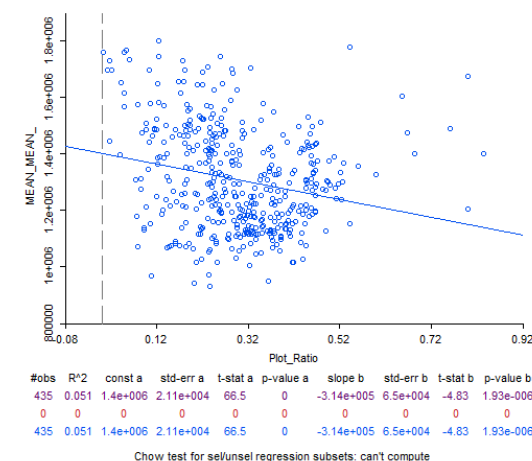


Figura 60 - Relação da radiação com o plot ratio

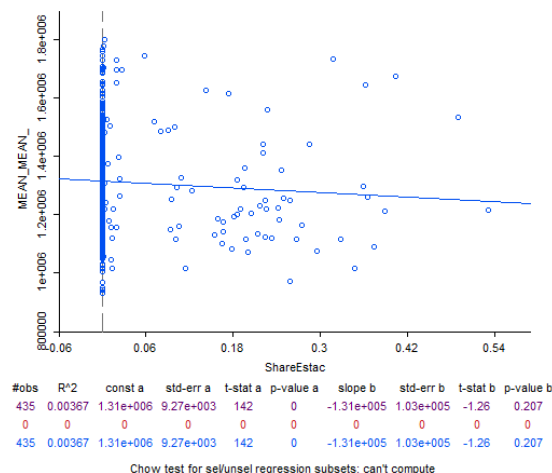


Figura 61 - Relação da radiação com a Proporção de área coberta por estacionamento

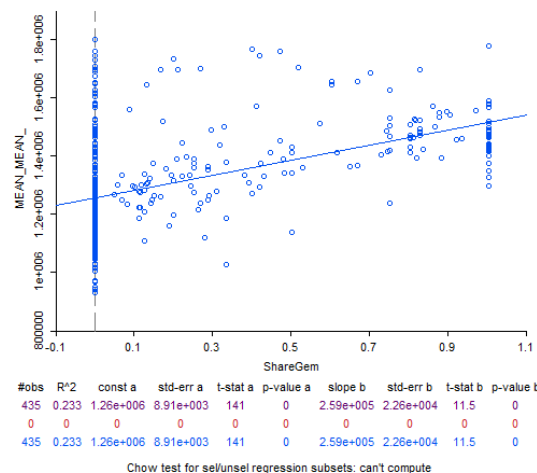


Figura 62 - Relação da radiação com a Proporção de moradias geminadas

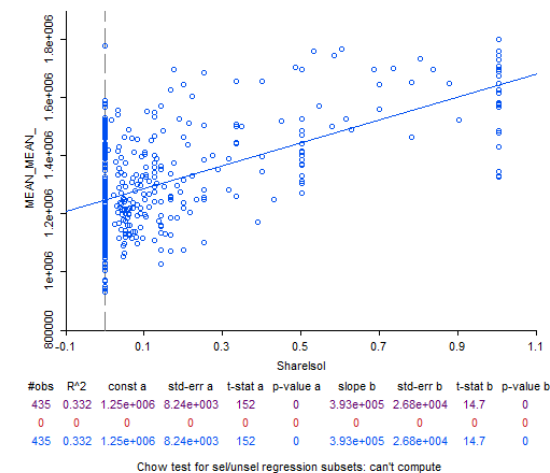


Figura 63 - Relação da radiação com a Proporção de moradias isoladas

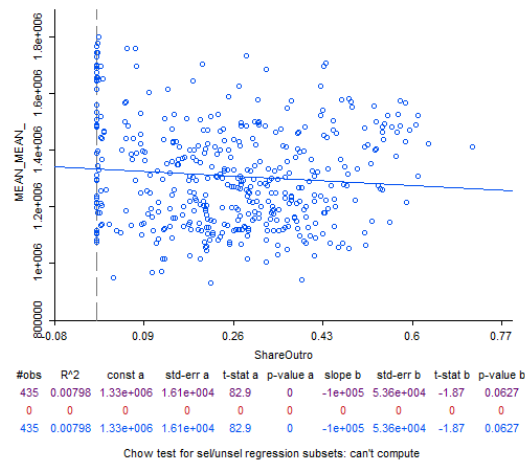


Figura 64 - Relação da radiação com a Proporção de área coberta por outros tipos de pavimentos

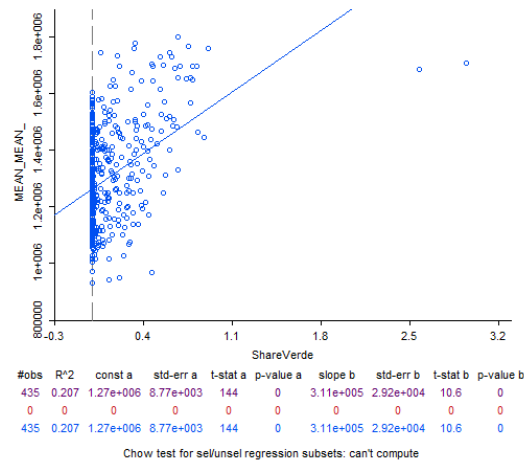


Figura 65 - Relação da radiação com a Proporção de áreas verdes

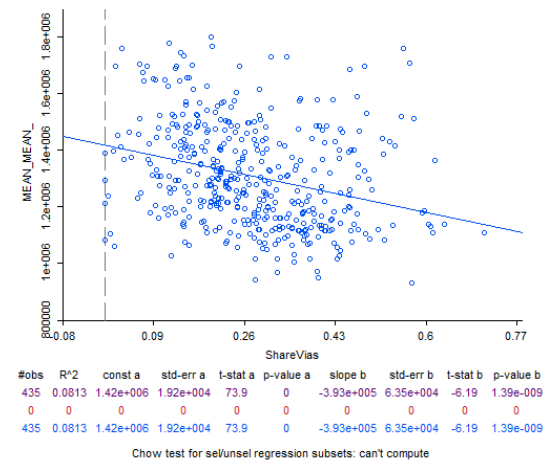


Figura 66 - Relação da radiação com a Proporção de área coberta por rede viária

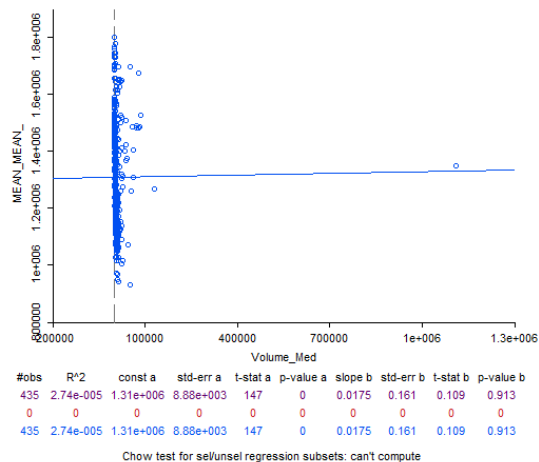


Figura 67 - Relação da radiação com o volume médio

## II – Estudo da dependência espacial

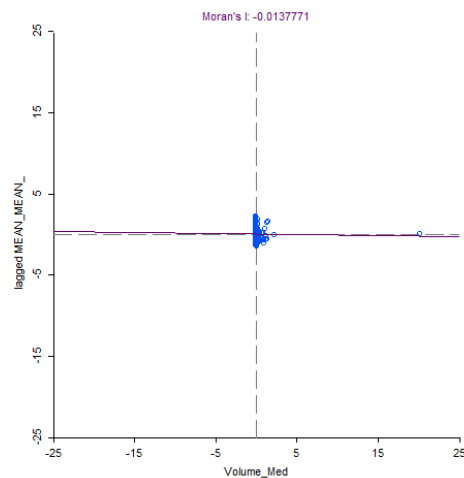


Figura 68 - Estudo da dependência espacial do volume médio

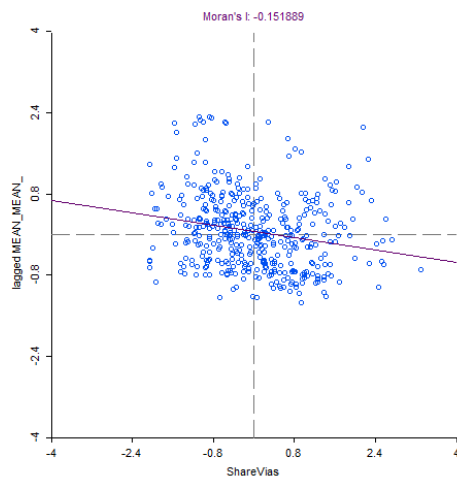


Figura 69 - Estudo da dependência espacial da Proporção de área coberta por rede viária

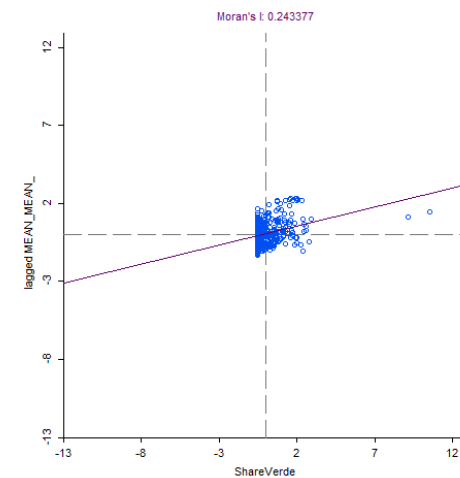


Figura 70 - Estudo da dependência espacial da Proporção de áreas verdes

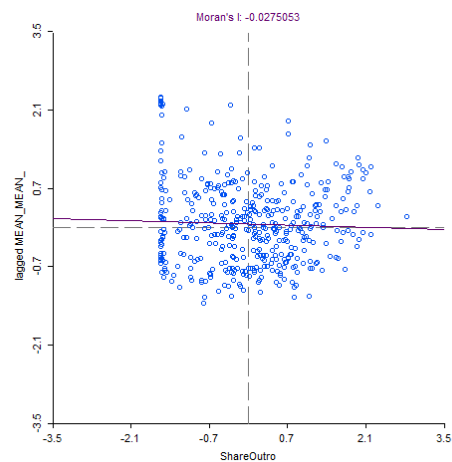


Figura 71 - Estudo da dependência espacial da Proporção de área coberta por outros tipos de pavimento

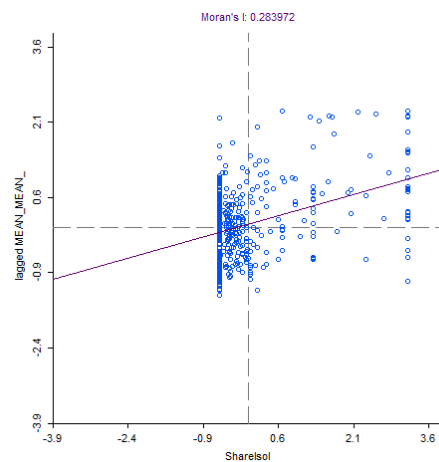


Figura 72 - Estudo da dependência espacial da Proporção de moradias isoladas

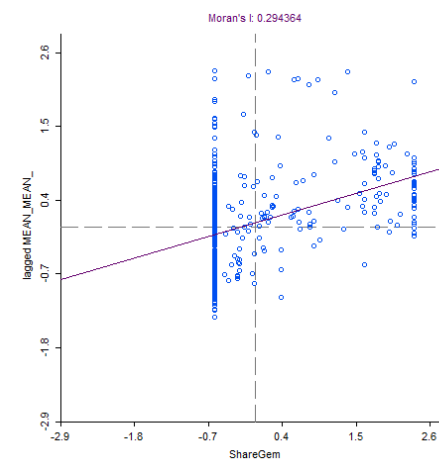


Figura 73 - Estudo da dependência espacial da Proporção de moradias geminadas

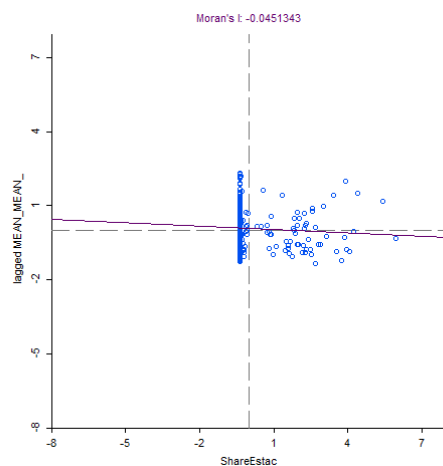


Figura 74 - Estudo da dependência espacial da Proporção de área coberta por estacionamento

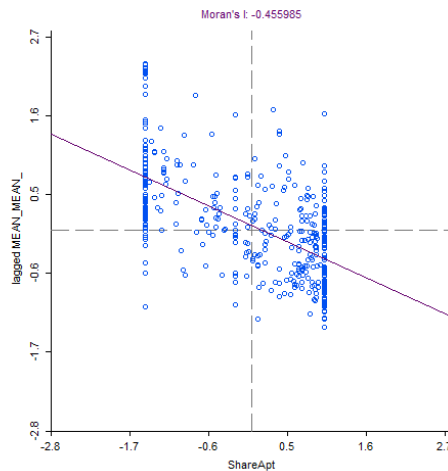


Figura 75 - Estudo da dependência espacial da Proporção de edifícios de apartamentos

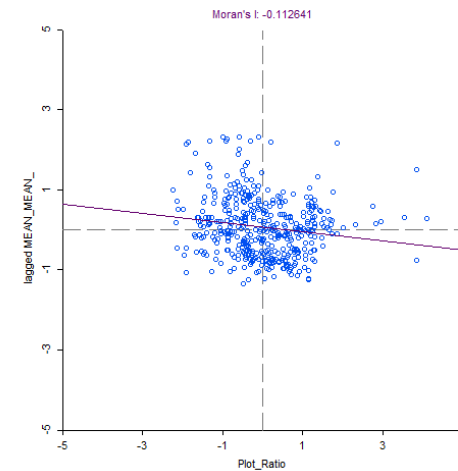


Figura 76 - Estudo da dependência espacial do plot ratio

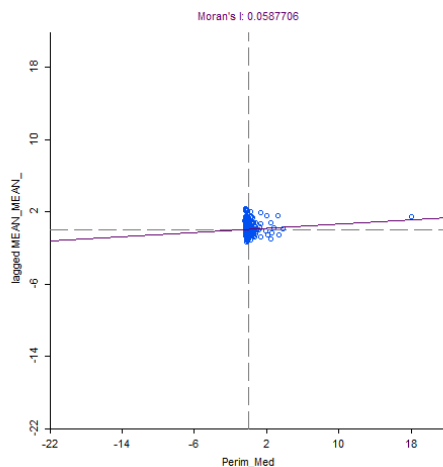


Figura 77 - Estudo da dependência espacial do perímetro médio

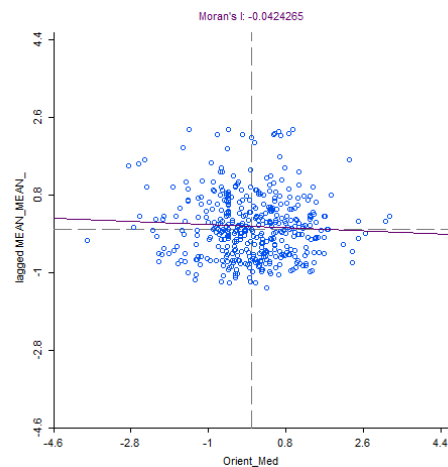


Figura 78 - Estudo da dependência espacial da orientação média

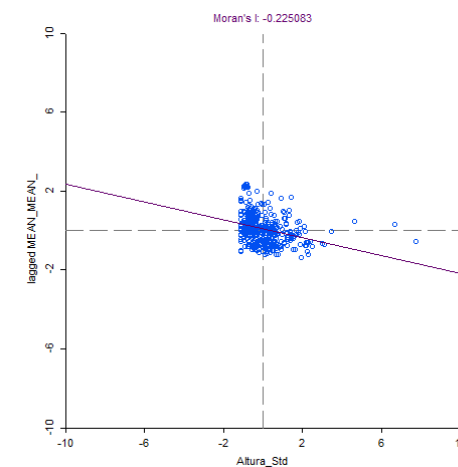


Figura 79 - Estudo da dependência espacial do desvio padrão da altura média



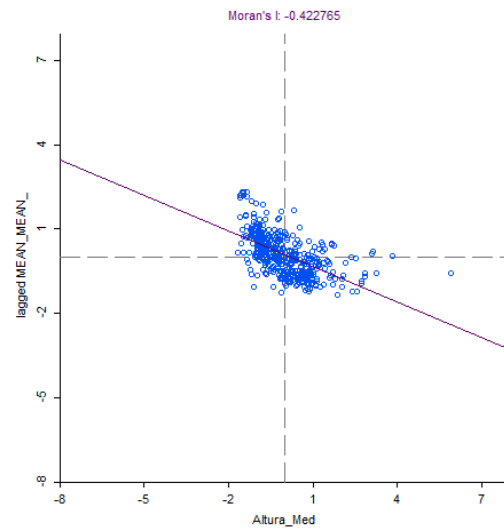


Figura 80 - Estudo da dependência espacial da altura média

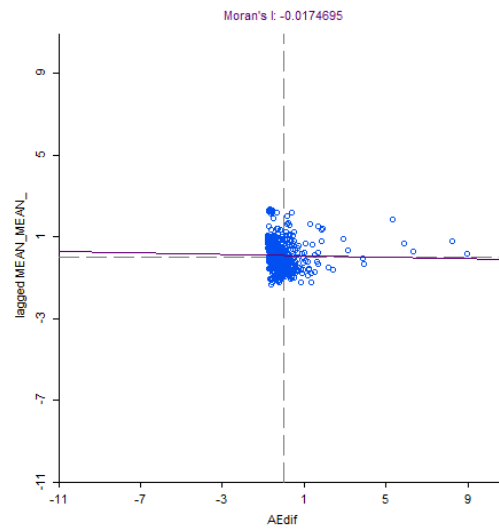


Figura 81 - Estudo da dependência espacial da área total edificada

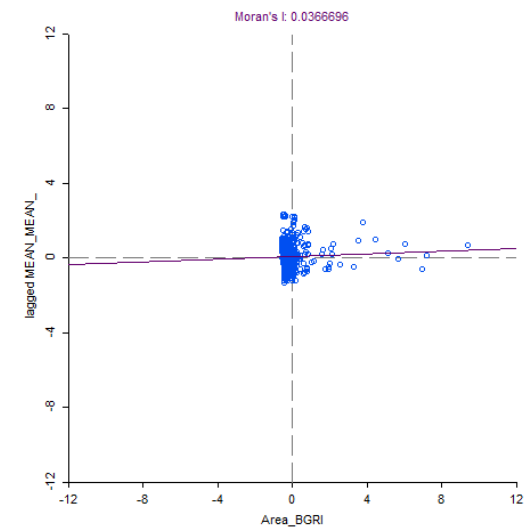


Figura 82 - Estudo da dependência espacial da área da BGRI